

PV/T耦合地源热泵脱脂供热系统优化配置研究

时国华¹, 李浩然¹, 雷 旭¹, 方雨涵²

(1. 华北电力大学动力工程系, 保定 071003; 2. 华北电力大学国际教育学院, 北京 102206)

摘 要: 针对工业设备制造中钢板脱脂用热存在高耗能和碳减排压力大的问题, 提出并构建光伏/光热耦合地源热泵脱脂供热系统(PV/T-GSHPD)并提出其运行策略。基于系统各设备能量转化模型, 以经济性最优为目标, 兼顾土壤热平衡和典型场景聚类分析, 建立PV/T-GSHPD优化配置模型, 研究并确定系统的优选设备及其容量。结果表明: PV/T-GSHPD应优选配置PV/T、地源热泵、集热水箱和蓄热水箱, 土壤补热装置优选PV/T; 与原脱脂电锅炉供热系统相比, PV/T-GSHPD的年脱脂用热成本和年环境成本分别降低69.1%和83.3%, PV/T-GSHPD具有显著的经济和环保优势; 典型日运行特性研究展示出PV/T-GSHPD全年对电网具有良好的日内调峰能力, 在夏季其等价用电中电网供电占比仅为35%, 可有效缓解夏季区域性电力供应压力。

关键词: 工业用热; 清洁供热; 光伏/光热; 地源热泵; 配置优化; 场景聚类

中图分类号: TK019

文献标志码: A

0 引 言

在去除钢板表面油污的工业生产过程中, 钢板热水脱脂清洗工艺消耗大量热量, 这些热量通常由电锅炉或燃气(煤)锅炉提供, 直接或间接导致高耗能、高碳排等问题。随着中国“双碳”战略目标的推进, 工业热力领域亟需向低碳化和高效化转型。华北地区太阳能和地热资源丰富, 为克服太阳能间歇性出力以及土壤热失衡的缺点^[1-2], 本文提出光伏/光热-地源热泵(photovoltaic/thermal-ground source heat pump, PV/T-GSHP)供热系统, 对推进北方清洁供热产业(尤其是分散供热)发展具有重要作用。

樊子慧等^[3]、李建伟等^[4]、刘仙萍等^[5]分别模拟研究了严寒地区或夏热冬冷地区民用建筑采用PV/T-GSHP供暖的可行性及其影响因素。王海涛等^[6]针对夏热冬冷地区居住建筑的冷、热和生活热水需求, 搭建了PV/T-GSHP试验台, 研究了制热工况下该系统的性能, 结果表明两者耦合不仅使光伏组件冬季的平均光电效率相对PV系统提升了1.7%, 还使整个系统的平均制热性能系数(coefficient of performance, COP)比单一地源热泵系统提高了2.2%。郑志行等^[7]提出光伏辅助地源热泵-空气源热泵系统, 通过空气源热泵分担热负荷, 解决了夏热冬冷地区校园建筑热负荷过大导致的土壤温度及GSHP性能大幅下降的问题, 但该系统初投资较大且7种运行模式运行调控复杂。

为进一步提升PV/T-GSHP的效率, 学者们对光伏组件倾角、地热井数量等^[8-11]设备参数开展了优化研究。同时, 国内外学者对此类系统的运行控制也开展了探索, 如王巍巍等^[12]提出基于NSGA-II和TOPSIS(或VIKOR)的多目标优化决策方法; 任心宇等^[13]采用基于MOBWO算法的双层优化模型进行运行优化, 结果表明与未优化的运行策略相比碳减排率、一次节能率、年降本率等均有不同程度的提升。此外, Niemelä等^[14]和Terashima等^[15]研究结果表明, PV/T-GSHP能高效制取55~60℃的热水, 可满足生活热水需求。

由此可见, 对于具有季节性冷负荷、季节性热负荷(采暖)和全年性热负荷(生活热水)的建筑领域, PV/T-GSHP在维持全年土壤热平衡的同时能够高效制备中低温热水, 但关于此类系统用于全年仅有热负荷工业热力场景的研究尚有不足。因此, 本文针对寒冷地区钢板热水脱脂工业场景, 提出PV/T耦合地源热泵脱脂供热系统, 聚类分析全年光/热负荷场景, 以经济、环境为目标对系统进行优化配置, 并分析其在各典型日的运行特性, 以期工业PV/T-GSHP供热提供参考。

1 PV/T耦合地源热泵脱脂供热系统

1.1 系统工作原理

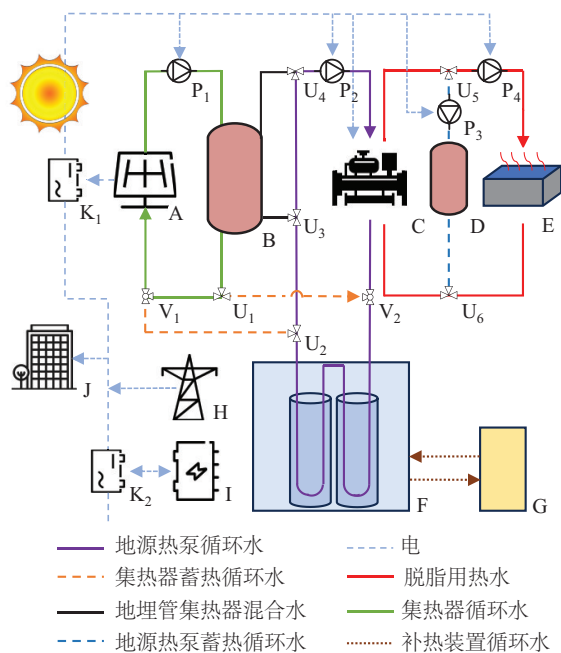
如图1所示, PV/T耦合GSHP脱脂供热系统(PV/T assisted ground source heat pump heating system for degreasing,

收稿日期: 2025-01-16

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5400-202212166A-1-1-ZN); 河北省重点研发计划(20376201D)

通信作者: 时国华(1980—), 男, 博士、副教授, 主要从事清洁能源高效利用及节能技术、传热传质优化理论及技术方面的研究。

lucksgh@126.com



A. PV/T; B. 集热水箱; C. 地源热泵; D. 蓄热水箱; E. 脱脂池; F. 地埋管;
G. 补热装置; H. 电网; I. 蓄电池; J. 办公用电; K₁、K₂. 逆变控制器;
P₁. 太阳能集热泵; P₂. 地源侧循环泵; P₃. 蓄热循环泵;
P₄. 脱脂池用热循环泵; V₁、V₂. 三通阀; U₁~U₆. 控制分流阀。

图1 PV/T-GSHPHSD示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PV/T-GSHPHSD

表1 PV/T-GSHPHSD运行模式

Table 1 PV/T-GSHPHSD operation modes

运行模式	描述	工作环路
1	PV/T向地埋管蓄热	A→P ₁ →B→U ₁ →V ₂ →F→U ₂ →V ₁ →A
2	热泵向蓄热水箱蓄热	C→U ₅ →P ₃ →D→U ₆ →C
3	GSHP供热	F→U ₂ →U ₃ →P ₂ →C→F, C→U ₅ →P ₄ →E→U ₆ →C
4	GSHP+蓄热水箱联合供热	(C+D)→U ₅ →P ₄ →E→U ₆ →(C+D)
5	PV/T+GSHP联合供热	F→U ₂ →U ₃ →B→U ₄ →P ₂ →C→U ₅ →P ₄ →E→U ₆ →C
6	PV/T+GSHP+蓄热水箱联合供热	F→U ₂ →U ₃ →B→U ₄ →P ₂ →(C+D)→U ₅ →P ₄ →E→U ₆ →(C+D)
7	蓄热水箱供热	D→U ₅ →P ₄ →E→U ₆ →D

季节	条件	太阳辐照度 <50 W/m ²	太阳辐照度 ≥50 W/m ²
冬季、 过渡季	蓄热水箱出力	模式4	模式6、7
	蓄热水箱蓄热	模式2	模式2、5
	无蓄热水箱参与	模式3	模式5
夏季		模式1、2、3、4、7	

图2 PV/T-GSHPHSD运行策略

Fig. 2 Operation strategy of PV/T-GSHPHSD

1.2.1 PV/T模型

PV/T的集热功率和发电功率分别为:

简称PV/T-GSHPHSD)主要由GSHP子系统、PV/T子系统和脱脂池换热管组成。其中,GSHP子系统由热泵、地埋管、循环水泵和蓄热水箱(可选,由优化配置确定)组成;PV/T子系统由PV/T、集热水箱和太阳能集热泵组成。

冬季和过渡季,太阳能资源相对缺乏且脱脂池热负荷相对较高,PV/T耦合GSHP同时向脱脂池供热。夏季,太阳能资源丰富且脱脂池热负荷较低,GSHP子系统单独向脱脂池供热;PV/T子系统将热量转移至土壤,兼顾土壤补热和PV/T效率提升。由于本系统全年取热会导致土壤“冷堆积”现象,若上述补热不足,考虑补热装置(额外的PV/T、电加热器或真空管集热器)向土壤额外补热,选用何种补热装置亦由优化配置确定。PV/T发电优先系统自用,多余电量向厂区办公建筑供电或向蓄电池(可选,由优化配置确定)存储。同时,PV/T-GSHPHSD考虑利用谷电蓄能,以期节约成本和电网的削峰填谷。

表1和图2分别为PV/T-GSHPHSD的运行模式及模式间切换的运行策略。

1.2 系统模型

PV/T-GSHPHSD涉及多个设备之间的耦合,可实现光-电、光-热、热-热的能量转化,因此为描述各设备的能量转化特性,为系统优化配置研究奠定基础,建立各设备的数学模型。

$$P_{h,PV/T,i} = (\tau\alpha)G_i A_{PV/T} (1 - \eta_{PV})\eta_{t,i} \quad (1)$$

$$P_{e,PV/T,i} = (\tau\alpha)G_i A_{PV/T} \eta_{PV,i} \quad (2)$$

式中: $P_{h,PV/T,i}$ —— i 时刻PV/T的集热功率, kW; $\tau\alpha$ ——法向入射下直射辐射的透射率 τ 与吸收率 α 的乘积,即有效透射吸收积,本文取0.85; G_i —— i 时刻的太阳辐照度, W/m²; $\eta_{t,i}$ —— i 时刻PV/T集热效率; $A_{PV/T}$ ——PV/T面积, m²; $P_{e,PV/T,i}$ —— i 时刻PV/T的发电功率, kW; $\eta_{PV,i}$ —— i 时刻PV/T发电效率。

1.2.2 热泵模型

由于PV/T集热为低品位热,需要通过热泵加热后才能有效利用,因此系统中GSHP可视为一种双源热泵,其热源可以是PV/T、地埋管,或两者联合使用,具体设备模型为:

$$P_{h,HP,i} = C_{OP} \cdot P_{e,HP,i} \quad (3)$$

$$P_{h,HP,i} = P_{h,PV/T,i} + P_{h,HP,qr,i} + P_{e,HP,i} \quad (4)$$

式中: $P_{h,HP,i}$ —— i 时刻 GSHP 制热功率, kW; C_{OP} ——GSHP 的 COP 值; $P_{e,HP,i}$ —— i 时刻 GSHP 耗电功率, kW; $P_{h,HP,qr,i}$ —— i 时刻 GSHP 从土壤取热的功率, kW。

当 COP 一定且忽略热损时, GSHP 独立运行的制热功率与地埋管从土壤取热功率成正比, 本文地埋管采用单 U 形, 地埋管换热器钻孔(地热井)数量由式(5)和式(6)估算。

$$P_{h,HP,qr,i} = P_{h,HP,i} (1 - 1/C_{OP}) \quad (5)$$

$$N = \frac{\max\{P_{h,HP,qr,i}\} \times 1000}{2q_1 l} \quad (6)$$

式中: N ——地热井数量; q_1 ——地埋管单位管长取热量, W/m; l ——钻孔深度, 本文取 100 m。

1.2.3 蓄热水箱模型

$$U_{hst,HS,i} = (1 - k_{loss})U_{hst,HS,i-1} + [P_{chin,HS,i}k_{ch} - P_{chout,HS,i}/k_{ex}] \Delta i \quad (7)$$

式中: $U_{hst,HS,i}$ 、 $U_{hst,HS,i-1}$ ——蓄热水箱在 i 时刻和 $i-1$ 时刻的储热量, kW·h; k_{loss} ——蓄热水箱的自耗率; $P_{chin,HS,i}$ —— i 时刻蓄热水箱的充热功率, kW; k_{ch} ——蓄热水箱的充能效率; $P_{chout,HS,i}$ —— i 时刻蓄热水箱的放能功率, kW; k_{ex} ——蓄热水箱的放能效率; Δi ——单位时间, 取 1 h。

1.2.4 蓄电池模型

$$U_{bat,i} = U_{bat,i-1} + [P_{cein,i}\delta_{ch} - P_{ceout,i}/\delta_{ex}] \Delta i \quad (8)$$

式中: $U_{bat,i}$ 、 $U_{bat,i-1}$ ——蓄电池在 i 时刻和 $i-1$ 时刻的蓄电量, kW·h; $P_{cein,i}$ —— i 时刻蓄电池充电功率, kW; δ_{ch} ——蓄电池的蓄电效率; $P_{ceout,i}$ —— i 时刻蓄电池放电功率, kW; δ_{ex} ——蓄电池的放电效率。

1.2.5 补热装置模型

当需要向土壤额外补热时, 本文考虑选择额外的 PV/T、太阳能真空管集热器(solar collector, SC)、电加热器(electric heater, EH)三者其一作为补热装置, 且认为补热装置制取的热量全转换为向土壤的补热量。额外的 PV/T 制热功率见式(1), SC 和 EH 的制热功率分别如式(9)和式(10)所示。

$$P_{SC,i} = A_{SC} F' [S_i - L(t_{p,i} - t_{env,i})] \quad (9)$$

$$P_{h,EH,i} = \eta_{EH} P_{e,EH,i} \quad (10)$$

式中: $P_{SC,i}$ —— i 时刻 SC 的集热功率, kW; A_{SC} ——SC 的集热面积, m²; F' ——SC 的集热效率; S_i —— i 时刻 SC 吸收的太阳辐照度, W/m²; L ——SC 的热损失系数, 取 5 W/(m²·°C); $t_{p,i}$ —— i 时刻 SC 表面温度, °C; $t_{env,i}$ —— i 时刻环境温度, °C; $P_{h,EH,i}$ —— i 时刻 EH 的制热功率, kW; η_{EH} ——EH 的制热效率; $P_{e,EH,i}$ —— i 时刻 EH 的耗电功率, kW。

1.3 决策变量

基于上述数学模型, 优化配置的决策变量为:

$$X = [U_{PV/T}, U_{HP}, U_{AH}, U_{hst,PV/T}, U_{hst,HS}, U_{bat}, U_N, x_{n+1}, \dots, x_m] \quad (11)$$

式中: $U_{PV/T}$ 、 U_{HP} 、 U_{AH} 、 $U_{hst,PV/T}$ 、 $U_{hst,HS}$ 、 U_{bat} 、 U_N ——PV/T、

GSHP、补热装置、集热水箱、蓄热水箱、蓄电池、地热井数量; $x_{n+1} \sim x_m$ ——可选设备的决策变量(0 表示不选, 1 表示选择); n ——PV/T-GSHPHD 中必选设备数量, 本文为 4, 即 PV/T、集热水箱、GSHP、地埋管为必选设备; m ——PV/T-GSHPHD 中设备总数, 本文为 7。

2 优化方法

PV/T-GSHP 供热系统性能和应用研究中, 设备容量配置多依赖经验方法选定, 并非最优配置, 进而对系统的优化运行也带来不利影响。此外, 系统设计时所侧重的优化目标(如能效、成本或环保等)也会对设备配置产生显著影响。因此, 基于上述系统构建、运行模式及各设备模型, 进一步建立 PV/T-GSHPHD 优化配置模型, 确定经济性最优的系统设备及相应额定容量。

2.1 目标函数

考虑到 PV/T 和 GSHP 的节能环保特性, 本文以年成本最小为目标, 建立 PV/T-GSHPHD 优化配置目标函数为:

$$\min f = C_{inv} + C_{o\&m} + C_b + C_{env} - C_s \quad (12)$$

式中: C_{inv} 、 $C_{o\&m}$ 、 C_b 、 C_{env} 、 C_s ——初投资年折合成成本、年维护成本、年购电成本、年环境成本、年发电收益, 元/a。

2.1.1 初投资

PV/T-GSHPHD 的初投资为图 1 中主要设备的购置成本, 考虑资金时间价值和设备可选, 年投资成本为:

$$C_{inv} = \sum_{k=1}^n C_k U_k R_k + \sum_{k=n+1}^m x_k C_k U_k R_k \quad (13)$$

$$R_k = \frac{r(1+r)^{d_k}}{(1+r)^{d_k} - 1} \quad (14)$$

式中: k ——PV/T-GSHPHD 中第 k 台设备; C_k ——第 k 台设备的单位投资成本, 元/kW 或元/(kW·h); U_k ——第 k 个设备的额定容量, kW 或 kW·h; R_k ——第 k 台设备的设备投资回收系数; x_k ——可选设备 $k(k \geq 5)$ 的决策变量; r ——设备的贴现率, 本文取 6.7%; d_k ——第 k 个设备的使用寿命, a。

2.1.2 维护成本

PV/T-GSHPHD 的维护成本假设与各设备的年运行输出成正比, 可表示为:

$$C_{o\&m} = \sum_{j=1}^3 d_j \sum_{i=1}^{24} \sum_{k=1}^m \omega_k P_{k,i} \quad (15)$$

式中: d_j ——第 j 季节典型日的年化代表时间, $j=1, 2, 3$ 分别代表冬季、过渡季、夏季, 分别为 91、182、92 d; ω_k ——第 k 台设备的单位维护成本, 元/kW; $P_{k,i}$ —— i 时刻第 k 台设备的输出功率, kW。

2.1.3 购电成本

PV/T-GSHPHD 的购电成本为 PV/T 所产电力不足系统自身耗电时从电网购买电力的成本, 可表示为:

$$C_b = \sum_{j=1}^3 d_j \sum_{i=1}^{24} c_{grid,i} P_{buy,i} \quad (16)$$

式中: $c_{grid,i}$ —— i 时刻电网购电价格, 元/(kW·h); $P_{buy,i}$ —— i 时刻 PV/T-GSHPHD 电网供电功率, kW。

2.1.4 环境成本

PV/T-GSHPHD 的环境成本为电网购电对应的碳税:

$$C_{env} = \delta \lambda_{grid} \sum_{j=1}^3 d_j \sum_{i=1}^{24} P_{buy,i} \quad (17)$$

式中: δ ——碳税, 本文取 0.02 元/kg(以 CO₂ 计); λ_{grid} ——电网购电单位碳排放系数, kg/(kW·h)(以 CO₂ 计)。

2.1.5 发电收益

PV/T 供应厂区办公楼的额外电力, 可减少企业向电网购买的办公用电, 节约相应购电成本, 因此 PV/T-GSHPHD 的发电收益可表示为:

$$C_s = \sum_{j=1}^3 d_j \sum_{i=1}^{24} c_{grid,i} P_{sup,i} \quad (18)$$

式中: $P_{sup,i}$ —— i 时刻 PV/T-GSHPHD 向办公建筑的供电功率, kW。

2.2 约束条件

2.2.1 系统能量平衡约束

基于本文提出的 PV/T-GSHPHD 架构和各运行模式中各设备之间的耦合关系可得任意时刻下 PV/T-GSHPHD 的热平衡和电平衡。

热平衡: i 时刻不同设备的输出功率之和应满足 i 时刻的脱脂池热负荷及蓄热量之和:

$$P_{h,HP,i} + x_{HS} P_{chout,HS,i} = Q_{load,i} + x_{HS} P_{chin,HS,i} \quad (19)$$

式中: x_{HS} ——蓄热水箱是否选用的决策变量; $Q_{load,i}$ —— i 时刻脱脂池热负荷需求, kW。

电平衡: i 时刻系统供电量与电网购电量之和应等于系统用电量与企业办公用电量之和:

$$P_{e,PV/T,i} + x_{bat} P_{ceout,i} + P_{buy,i} = P_{e,HP,i} + x_{EH} P_{e,EH,i} + x_{bat} P_{cein,i} + P_{sup,i} \quad (20)$$

式中: x_{bat} 、 x_{EH} ——蓄电池、电加热器(electric heater, EH)是否选用的决策变量。

2.2.2 设备容量约束

$$U_k \leq U_{k,max} \quad (21)$$

式中: $U_{k,max}$ ——第 k 台设备允许安装的容量最大值, 受场地面积等因素影响, kW。

2.2.3 设备运行约束

第 k 台设备能量输出应保持在容量之内, 即:

$$\theta_{k,min} U_k \leq P_{k,i} \leq \theta_{k,max} U_k \quad (22)$$

式中: $\theta_{k,min}$ 、 $\theta_{k,max}$ ——第 k 台设备最小和最大的负载率。

蓄热/集热水箱运行时需满足储热状态和充放能功率

约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{chin,i} \leq u_{chin,i} P_{chin,max} \\ 0 \leq P_{chout,i} \leq u_{chout,i} P_{chout,max} \\ H_{SS,min} U_{hst,max} \leq U_{hst,i} \leq H_{SS,max} U_{hst,max} \\ u_{chin,i} + u_{chout,i} \leq 1 \\ u_{chin,i} \in \{0,1\}, u_{chout,i} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_{chin,i}$ 、 $P_{chout,i}$ —— i 时刻蓄热/集热水箱充放能功率, kW; $P_{chin,max}$ 、 $P_{chout,max}$ ——蓄热/集热水箱最大充、放能功率, kW; $H_{SS,max}$ ——蓄热最小、最大状态; $U_{hst,min}$ 、 $U_{hst,max}$ ——蓄热/集热水箱最小、最大储热容量, kW·h; $U_{hst,i}$ —— i 时刻蓄热/集热水箱的储热容量, kW·h; $H_{SS,min}$ 、 $u_{chin,i}$ 、 $u_{chout,i}$ —— i 时刻蓄热/集热水箱的蓄热和放热状态, 为 0-1 变量, 0 表示停止, 1 表示运行。

蓄电池与水箱约束相似, 仅蓄电状态 SOC 不同, 具体技术参数详见后文, 此处不再赘述。

2.2.4 土壤热平衡约束

PV/T-GSHPHD 优先考虑夏季将 PV/T 多余的热量向土壤补热(模式 1), 补热量为:

$$Q_{PV/T,br,year} = d_3 \sum_{i=1}^{24} P_{h,PV/T,i} \quad (24)$$

式中: $Q_{PV/T,br,year}$ ——PV/T 子系统夏季由地埋管向土壤的蓄热量, kW·h。

年累计补热量和取热量之比不能低于最小排取热量比^[16], 若补热不足则由补热装置继续补热。本文忽略补热装置与地埋管的换热损失, 其全年补热量等于其全年产热量。土壤补热应满足:

$$\eta_{imb,min} Q_{HP,q,year} \leq Q_{AH,br,year} + Q_{PV/T,br,year} \quad (25)$$

$$Q_{AH,br,year} = x_{SC} Q_{SC,year} + x_{EH} Q_{EH,year} + x_{PV/T,sup} Q_{PV/T,sup,year} \quad (26)$$

$$Q_{k,year} = \sum_{j=1}^3 d_j \sum_{i=1}^{24} P_{k,i} \quad (27)$$

式中: $\eta_{imb,min}$ ——最小排取热量比, 本文取 80%; $Q_{HP,q,year}$ ——GSHP 全年从土壤的取热量, kW·h; $Q_{AH,br,year}$ ——补热装置全年补热量, kW·h; $Q_{PV/T,sup,year}$ ——额外 PV/T 全年补热量, kW·h; x_{SC} 、 x_{EH} 、 $x_{PV/T,sup}$ ——SC、EH、额外 PV/T 是否选用的决策变量; $Q_{SC,year}$ ——SC 全年补热量, kW·h; $Q_{EH,year}$ ——EH 全年补热量, kW·h; $Q_{k,year}$ ——设备 k 的全年累计热量, kW·h, 其中 k 表示 HP、SC、EH、PV/T。

2.2.5 决策变量约束

由于 PV/T、集热水箱、GSHP、地热井为必选设备, 决策变量 $U_{PV/T}$ 、 U_{hst} 、 $P_{V/T}$ 、 U_{HP} 、 U_N 均应大于 0。可选设备是否选用的决策变量应满足:

$$\begin{cases} x_{HS} = 1, Q_{chin,HS,i} \neq 0 \\ x_{bat} = 1, P_{cein,i} \neq 0 \\ x_{SC} + x_{EH} + x_{PV/T,sup} = 1 \\ x_k \in \{0,1\} \end{cases} \quad (28)$$

2.3 脱脂池动态热负荷模型

热负荷 Q_{load} 作为 PV/T-GSHPHD 热平衡的关键参数, 本

文建立脱脂池动态热负荷模型。钢板热水脱脂采用灌注法,脱脂期间钢板需在含有碱性脱脂剂的高温碱水池中浸泡 3~5 min;为保证脱脂液脱脂性能,高温碱水池水温一般维持在 50~60 °C^[17-18]。脱脂后,将钢板放入高温清水池一次水洗,以洗净钢板上的化学残留物,再进入常温水池二次水洗。整个脱脂池分为高温碱水池、常温水池和高温清水池 3 个水池,如图 3 所示。

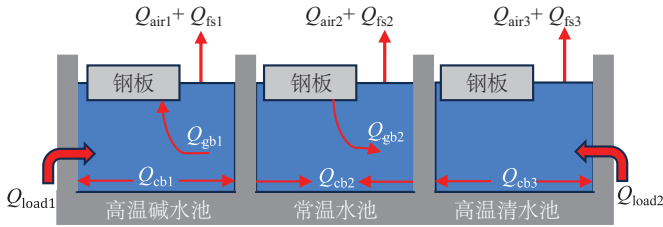


图3 脱脂池换热模型

Fig. 3 Heat exchange model for degreasing tank

以高温碱水池为例,其主要的热损失为:水池与空气的对流换热 Q_{air1} 、水池与钢板的对流换热 Q_{gb1} 、水池与池壁的对流换热 Q_{cb1} 及水池与空气的辐射换热 Q_{fs1} ;得热来自于供热侧 Q_{load1} 。因此,高温碱水池热平衡为:

$$c_w m_w \frac{\Delta t_{w1}}{\Delta \tau} = Q_{load1,i} + Q_{air1,i} + Q_{gb1,i} + Q_{cb1,i} + Q_{fs1,i} \quad (29)$$

式中: c_w ——水的比热容, kJ/(kg·°C); m_w ——水池内水的质量, kg; $\Delta t_{w1}/\Delta \tau$ ——高温碱水池内水的温度变化率, °C/s。

2.3.1 水池与空气的对流换热

$$Q_{air1,i} = h_{air} A_1 (t_{fi} - t_{w1,i}) \quad (30)$$

式中: h_{air} ——水池与空气的对流换热系数, W/(m²·°C); A_1 ——水池表面面积, m²; t_{fi} —— i 时刻水池周围的环境温度, °C。

2.3.2 水池与钢板、池壁的对流换热

$$Q_{gb1,i} = h_{gb} A_2 (t_{gb1,i} - t_{w1,i}) \quad (31)$$

$$Q_{cb1,i} = h_{cb} A_3 (t_{cb1,i} - t_{w1,i}) \quad (32)$$

式中: h_{gb} ——水池与钢板的强制对流换热系数, W/(m²·°C); A_2 ——钢板表面积, m²; $t_{gb1,i}$ —— i 时刻钢板的温度, °C; h_{cb} ——水池与池壁的对流换热系数, W/(m²·°C); A_3 ——水池池壁表面积, m²; $t_{cb1,i}$ —— i 时刻高温碱水池池壁的温度, °C。

2.3.3 水池与周围环境的辐射换热

$$Q_{fs1,i} = \varepsilon A_1 \sigma (T_{fi}^4 - T_{w1,i}^4) \quad (33)$$

式中: ε ——水池表面的发射率, 取 0.96; σ ——黑体辐射常数, 取 5.67×10^{-8} W/(m²·°C⁴)。

高温清水池和常温水池热平衡方程类似,不再赘述。同一时刻,高温碱水池和高温清水池的得热之和即为热负荷。

2.4 聚类算法

为解决系统中 PV/T 出力的不确定性以及大量场景集导致的计算耗时问题,本文选取具有典型特征的“场景”来概括

全年的数据特征。由于太阳辐射具有显著的时序性,厂房内脱脂热负荷一定程度上亦受季节影响,因此本文利用场景聚类分析方法确定能够反映每个季节数据特征的典型场景,并将场景划分为冬季、过渡季和夏季 3 个类别。

鉴于热负荷与太阳辐射在数量级上的差异会对聚类分析的准确性造成负面影响,本文选用线性函数归一化方法对各类数据进行归一化处理。

$$a_{norm} = \frac{a - a_{min}}{a_{max} - a_{min}} \quad (34)$$

式中: a 、 a_{min} 和 a_{max} ——某类数据的原始数据值、最小值和最大值。

本文采用改进 ISODATA 算法^[19]确定典型场景,这是因为其在运行期间可动态调整聚类数目得到最优聚类值,且在选择聚类中心时被选中的初始聚类中心之间聚类越远越易收敛。

2.5 优化配置流程

由 2.1 节和 2.2 节内容可知, PV/T-GSHPHD 优化配置是混合整数线性规划问题,本文在 Matlab 软件环境下利用 CPLEX 求解,优化流程如图 4 所示。

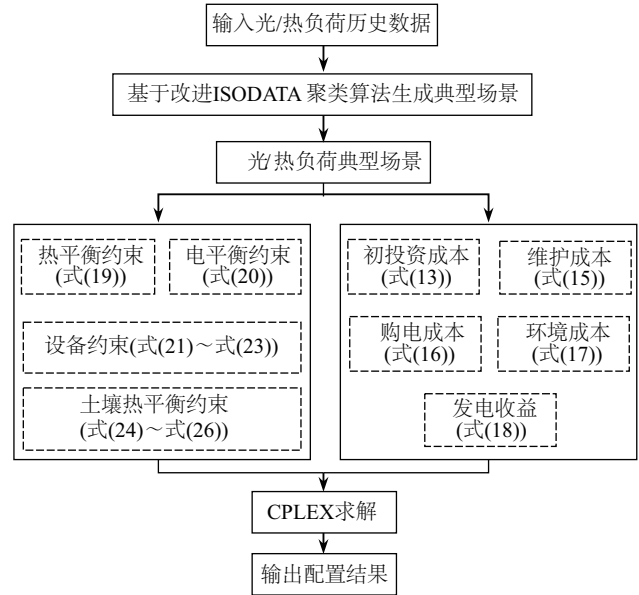


Fig. 4 Optimization process for PV/T-GSHPHD in typical scenarios

3 案例分析

3.1 基础数据

本文以河北省保定市某设备制造企业的钢板脱脂池为例,脱脂池参数取值见表 2。利用 EngeryPlus 软件模拟得到典型气象年条件下脱脂池所在厂房的逐时室内温度,如图 5 所示。

表 2 脱脂池相关参数

Table 2 Parameters related to degreasing tank

参数	取值	参数	取值
A_1/m^2	22.50	$h_{\text{air}}/[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$	0.95
A_2/m^2	36.00	$h_{\text{gb}}/[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$	1466.27
A_3/m^2	21.00	$h_{\text{cb}}/[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$	1302.17
m_w/kg	18000.00	$c_w/[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$	4.18

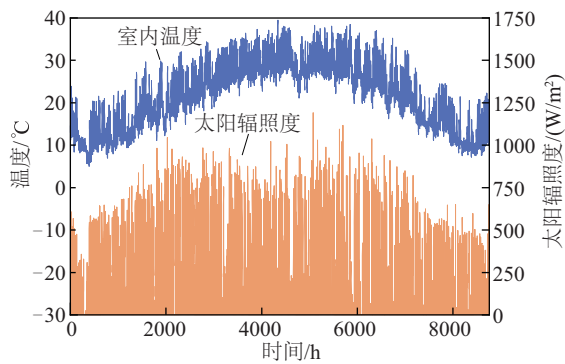


图 5 逐时环境参数

Fig. 5 Hourly environmental parameters

基于企业的生产班制,表 3 给出了脱脂池运行策略。由于每次钢板脱脂需要 5 min,为满足高温水池水温的升温速率需求,脱脂池加热需用 100 kW 的热源。进一步根据 2.3 节所建脱脂池负荷模型,以 60 s 为步长,可得全年热负荷(如图 6 所示),脱脂池全年累计耗热量为 362.78 MW·h。

表 3 脱脂池运行策略

Table 3 Operation strategy of degreasing tank

时间	运行策略
08:00—18:00	脱脂, <50 °C 加热, ≥60 °C 停止加热
18:00—次日 08:00	脱脂池盖上保温盖板保温
03:00—07:00	补水+谷电预热, 达到 60 °C 停止预热

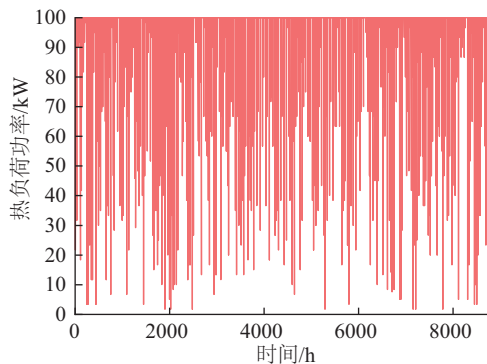


图 6 脱脂池全年热负荷

Fig. 6 Annual heat load of degreasing tank

以全年天数作为光/热负荷的历史场景数量,以冬季典型日为例,使用改进 ISODATA 算法后得到最佳聚类数目为 2,其两个场景的聚类中心如图 7 所示,概率分别为 36.67% 和 63.33%,二者概率加权平均后最终得到冬季典型场景,同理可得过渡季和夏季典型日场景,如图 8 所示。

表 4 和表 5 分别给出了 PV/T-GSHPD 优化配置所需的设备经济参数和技术参数。参考系统为脱脂池原有 100 kW 电锅炉供热系统。根据水箱与 PV/T 面积推荐配比为 50~150 L/m²,本文设定集热水箱容积对应的单位 PV/T 板面积取 100 L/m²。由于本文采用典型日进行容量优化,为了确保最

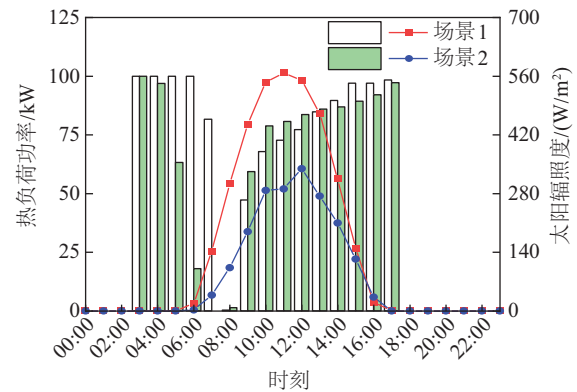
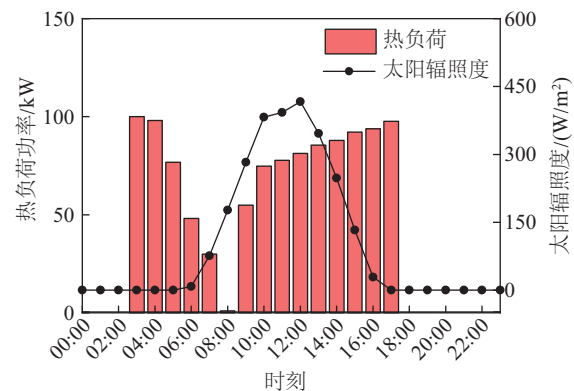
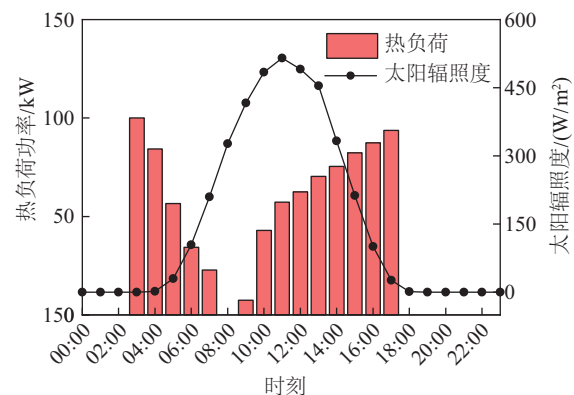


图 7 冬季典型日场景聚类中心

Fig. 7 Cluster center for winter typical day scenario



a. 冬季



b. 过渡季

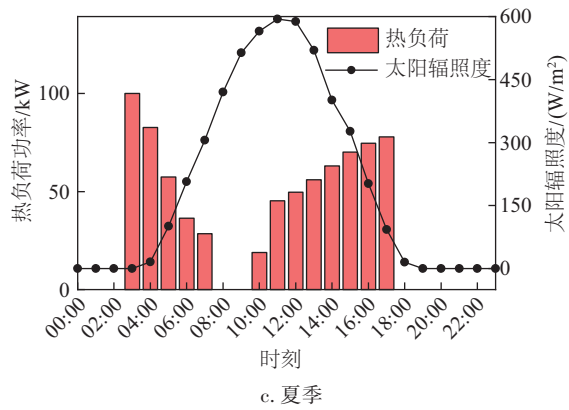


图8 典型日场景

Fig. 8 Typical day scenarios

表4 主要设备经济参数

Table 4 Economic parameters of key equipment

设备	投资成本	运维成本/ (元/kW)	使用寿命/ a
PV/T	660 元/m ²	0.050	20
集热水箱	450 元/m ³	0.016	10
蓄热水箱	140 元/(kW·h)	0.016	10
蓄电池	1000 元/(kW·h)	0.080	10
地热井	7000 元/口	0.030	20
GSHP	601 元/kW	0.030	20
EH	880 元/kW	0.030	20
SC	580 元/kW	0.050	20
电锅炉	1045 元/kW	0.020	20

表5 主要设备技术参数

Table 5 Technical parameters of key equipment

设备	参数	取值
GSHP	平均 COP	2.50
PV/T	$\eta_{i,STC}$	0.40
	$\eta_{PV,STC}$	0.18
蓄热水箱	蓄/放能效率	0.90
	H_{SSmin}	0.10
	H_{SSmax}	0.90
蓄电池	蓄/放能效率	0.95
	SOC _{min}	0.20
	SOC _{max}	0.80
SC	F'	0.50
EH	η_{EH}	0.95
电锅炉	热效率	0.95

不利工况(PV/T 无法集热且蓄热水箱无法出力)下系统正常供热,热泵需满足脱脂池最大瞬时热负荷(100 kW),考虑到其电能损耗(取 5%),额定制热功率取 106 kW。电网购电单位碳排放系数取 2021 年河北省电力平均二氧化碳排放因子 0.7901 kg/(kW·h)。电网购电参考保定市工商业分时电价,见表 6。本文部分决策变量的取值范围如表 7 所示。

表6 分时电价

Table 6 Time-of-use electricity prices

分时	时段	电价/ [元/(kW·h)]
尖峰	17:00—19:00	1.1083
高峰	08:00—10:00, 16:00—17:00,	0.9669
	19:00—22:00	
平段	00:00—01:00, 07:00—08:00,	0.6758
	10:00—12:00, 14:00—16:00,	
低谷	22:00—24:00	0.3848
	01:00—07:00, 12:00—14:00	

表7 优化参数取值范围

Table 7 Range of optimized parameters

参数	取值范围
PV/T 面积/m ²	(0, 500]
地热井数量/口	(0, 15]
蓄热水箱容量/(kW·h)	[0, 400]
蓄电池容量/(kW·h)	[0, 80]
SC 面积/m ²	[0, 100]
EH 功率/kW	[0, 60]

3.2 优化结果分析

表 8 为配置优化结果。可看出,由于目前蓄电池寿命较短、价格较高,在经济性最优目标下,PV/T-GSHPHD 的蓄能形式为蓄热,PV/T 富余的电量通过热泵转化为热量存储以及向厂区办公楼。由于 PV/T 能够同时提供电能和热能,具备了更好的经济竞争力,因此辅助补热装置优选结果为额外增加 54 m² PV/T。

由表 9 可知,虽然 PV/T-GSHPHD 年投资成本是参考供热系统(电锅炉供热)年投资成本的 4 倍,但由于其年购电成本显著下降(约为参考系统年购电成本的 15.3%),且 PV/T 富余的电进一步降低了企业办公用电成本,因此相比参考供热系统,脱脂池用热成本由原先的 25.39 万元/a 降至 7.84 万元/a,减少约 69.1%。这说明本文构建的 PV/T-GSHPHD 系统和运行策略能够有效利用 PV/T 良好的产电/热性能、GSHP 的高效制热性能和谷电的经济性实现全年经济地向脱脂池供热的目标。此外,PV/T 和 GSHP 在能量制备上的环境友好特性

表8 配置优化结果

Table 8 Optimization results

配置参数	容量
基本 PV/T 面积/m ²	234
集热水箱体积/m ³	24
GSHP 额定制热功率/kW	106
地热井数量/口	13
蓄热水箱容量/kWh	308
蓄电池容量/kWh	
补热 PV/T 面积/m ²	54
EH 额定功率/kW	
SC 集热面积/m ²	

使脱脂池供热的年环境成本大幅降低,仅为参考供热系统环境成本的 16.6%,展现出更优的环境效益。

表9 PV/T-GSHPHD 和参考供热系统经济性比较

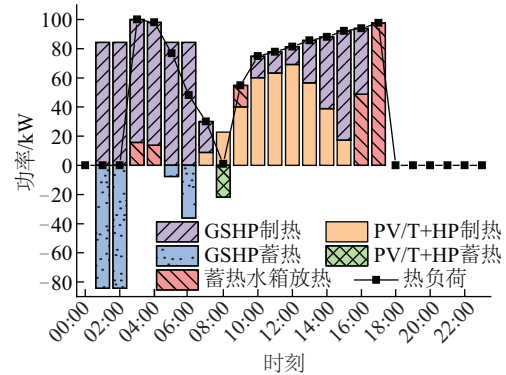
Table 9 Economic comparison between PV/T-GSHPHD and reference heating system

类型	本系统	参考系统
年成本 $f/(10^3 \text{ 元/a})$	78.4	253.9
年投资成本 $C_{\text{inv}}/(10^3 \text{ 元/a})$	36.5	9.4
年维护成本 $C_{\text{om}}/(10^3 \text{ 元/a})$	16.4	7.3
年购电量 $P_{\text{buy}}[(\text{MW} \cdot \text{h})/\text{a}]$	78.3	380.0
年购电成本 $C_{\text{e}}/(10^3 \text{ 元/a})$	35.3	230.0
年发电收益 $C_{\text{g}}/(10^3 \text{ 元/a})$	10.9	0.0
年环境成本 $C_{\text{env}}/(10^3 \text{ 元/a})$	1.2	7.2

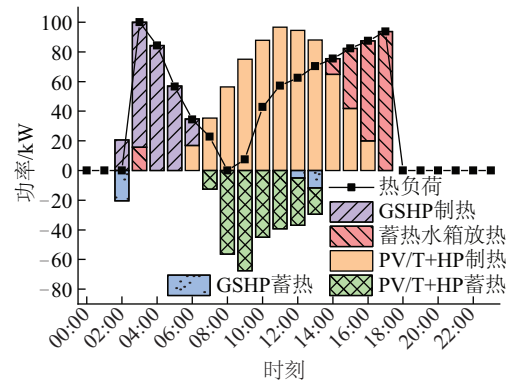
为了分析 PV/T-GSHPHD 优化配置后各设备的运行情况,对系统在 3 个典型日的运行特性进行分析。如图 9 所示,在不同典型日,各设备的逐时出力均能满足其容量配置约束,且整个系统满足脱脂池热负荷,这表明优化后的 PV/T-GSHPHD 全年均可满足企业的钢板脱脂用热需求。

由图 9a 可知,冬季典型日,蓄热水箱全天共蓄热 267.5 kW·h,由于冬季脱脂池热负荷高且太阳辐照度较低,日间 PV/T 富余制热量极少,因此蓄热集中在夜间谷电时段,利用谷电驱动 GSHP 蓄热占比高达 91.8%,仅在 08:00—09:00 以 PV/T 富余的制热量作为热源并利用 PV/T 富余的光电驱动热泵蓄热。07:00—16:00,太阳辐照度大于 50 W/m²,集热泵启动,PV/T-GSHPHD 优先利用 PV/T 的光热作为热泵热源制取热量满足脱脂池热负荷,在电价平段和低谷段,不足部分由 GSHP 制热满足;在电价高峰段(09:00—10:00),不足部分则

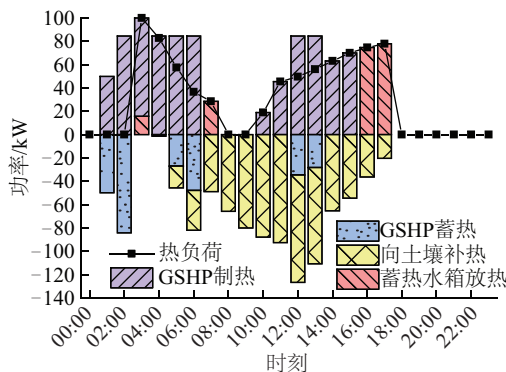
由蓄热水箱放热满足,以降低运行成本。16:00—18:00,太阳辐照度不足,PV/T 停止工作,蓄热水箱所蓄热量优先用于满足电价尖峰时刻(17:00—18:00)的脱脂热负荷,剩余热量满足电价高峰时刻(16:00—17:00)的热负荷,不足部分由 GSHP 利用高峰电驱动制热满足。需要注意的是,蓄热水箱在 03:00 和 04:00 放热,这是因为这两时刻热泵从地理管取热量达到最大值,若依赖 GSHP 完全满足脱脂热负荷将导致其 COP 下降。整体来看,在冬季典型日,蓄热水箱、以 PV/T 制热作为热源的热泵和 GSHP 的脱脂供热量之比约为 1:1.8:3。



a. 冬季典型日



b. 过渡季典型日



c. 夏季典型日

图9 典型日运行特性分析

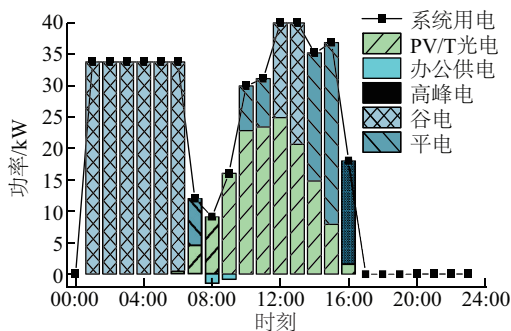
Fig. 9 Analysis of operating characteristics on typical days

由图 9b 可知,过渡季典型日,蓄热水箱全天共蓄热 307.7 kW·h,由于过渡季太阳辐照度相较于冬季上升且热负

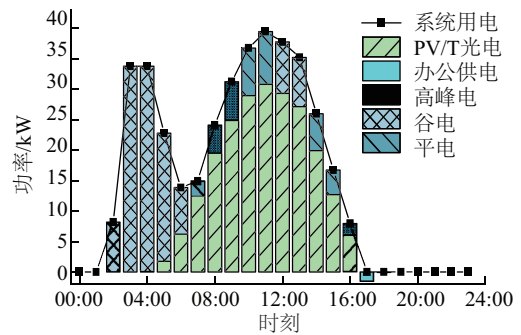
荷相对较低,日间 PV/T 富余热量多,因此蓄热集中于日间 07:00—14:00,利用 PV/T 富余热量及富余电量驱动热泵的蓄热量占总蓄热量的 87.8%。14:00—18:00,由于太阳辐照度逐渐减小同时叠加热负荷的增大,以 PV/T 产热作为热源的热泵无法经济高效地满足脱脂用热需求,蓄热水箱放热补充;由于 17:00—18:00 太阳辐照度低于 50 W/m^2 ,脱脂用热量全部由蓄热水箱提供。与冬季典型日相比,GSHP 仅在谷电期间运行,蓄热水箱、以 PV/T 制热作为热源的热泵和 GSHP 的脱脂供热量之比约为 1:1.8:1。可见,过渡季太阳辐照度增强,PV/T 发挥了更大的供能作用,显著减少了对 GSHP 和电网的依赖并减缓了土壤“冷堆积”现象。

由图 9c 可知,相比于冬季和过渡季,夏季太阳辐照度进一步提升,日照时间长,而脱脂池热负荷最小。05:00—18:00, PV/T 子系统在夏季开启蓄热模式后经埋管向土壤补热,日补热量为 $779.2 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。蓄热水箱全部在谷电时段由 GSHP 蓄热,利用谷电蓄热量达到 3 个典型日中的最高,为 $273.7 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。夏季典型日脱脂池用热由蓄热水箱和 GSHP 提供,两者的脱脂池供制热量占比为 1:3.6。

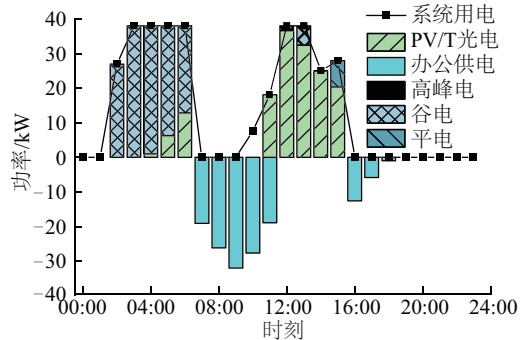
图 10 给出了 3 个典型日下 PV/T-GSHPHD 的用电量及用电结构。冬季典型日, PV/T-GSHPHD 的总用电量为 $470 \text{ kW}\cdot\text{h}$, PV/T 和电网供电之比约为 1:2.2,其中,电网供电中谷电、平电和高峰电的占比分别为 73%、22% 和 5%。过渡季典型日, PV/T-GSHPHD 的总用电量为 $382 \text{ kW}\cdot\text{h}$, PV/T 和电网供电之比约为 1:0.75,其中电网供电中谷电、平电和高峰电的占比分别为 74%、18% 和 8%。夏季典型日, PV/T-GSHPHD 的总用电量为 $335 \text{ kW}\cdot\text{h}$, PV/T 和电网供电之比约为 1:1.17,其中,电网供电中谷电和平电分别占 95% 和 5%。可见,无论哪个典型日, PV/T-GSHPHD 的电网用电中谷电和平电占比超过 92%,谷电占比超过 73%,表明本文所构建的 PV/T-GSHPHD 全年具备良好的经济性,且对电网具有突出的日内调峰潜力。此外,冬季、过渡季和夏季典型日, PV/T 富余的电供办公用,分别为 2.29 、 1.63 和 $137.4 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。若将上述 PV/T 的办公用电等值替换 PV/T-GSHPHD 的电网用电,则 3 个典型日下 PV/T-GSHPHD 用电中 PV/T 和电网供电之比可进一步转换为 1:2.15、1:0.74 和 1:0.55,表明从冬季到过渡季再



a. 冬季典型日



b. 过渡季典型日



c. 夏季典型日

图 10 典型日系统用电波动

Fig. 10 Fluctuations in system electricity consumption on typical days

到夏季, PV/T-GSHPHD 对电网依赖度明显下降,也表明 PV/T-GSHPHD 在夏季可有效降低高峰用电负荷,缓解区域性电力供应紧张问题。

4 结 论

为实现工业脱脂的高效低碳供热,本文构建 PV/T-GSHPHD 系统,并提出改进 ISODATA 算法和 CPLEX 求解的 PV/T-GSHPHD 优化配置方法,主要得出结论如下:

1) 兼顾经济性和土壤热平衡, PV/T-GSHPHD 的优选配置为 GSHP、PV/T、蓄热水箱和集热水箱,土壤补热装置优选 PV/T。

2) 与脱脂池原有电锅炉供热系统相比, PV/T-GSHPHD 具有显著的经济和环保优势,年用热成本和年用热环境成本仅为原先的 31% 和 17%,有利于推进工业经济低碳化用热。

3) 对电网而言, PV/T-GSHPHD 全年具备良好的日内调峰潜力,可从用户侧有效缓解区域性夏季电力供应紧张难题,其推广应用可助力新型电力系统的构建。

[参考文献]

- [1] WU L J, ZHAO B, AO X Z, et al. Performance analysis of the aerogel-based PV/T collector: a numerical study [J]. Solar energy, 2021, 228: 339-348.

- [2] 罗佐县, 高珊珊, 孙庆丰, 等. 夏热冬冷地区浅层地热能开发利用路径初探[J]. 当代石油石化, 2020, 28(9): 7-14.
LUO Z X, GAO S S, SUN Q F, et al. Exploration on development and utilization of shallow geothermal energy in HSCW areas [J]. Petroleum & petrochemical today, 2020, 28(9): 7-14.
- [3] 窦子慧, 刘景霞, 李宝利. 严寒地区太阳能跨季节蓄热热泵系统研究[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(4): 52-58.
DOU Z H, LIU J X, LI B L. Study on the solar-assisted ground-source heat pump system with seasonal heat storage in cold regions [J]. Integrated intelligent energy, 2023, 45(4): 52-58.
- [4] 李建伟, 鲍玲玲, 苗壮, 等. PV/T耦合中深层地源热泵供暖系统运行特性研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 219-227.
LI J W, BAO L L, MIAO Z, et al. Study on operation characteristics of PV/T coupled middle-deep ground source heat pump heating system [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(9): 219-227.
- [5] 刘仙萍, 雷豫豪, 田东, 等. 夏热冬冷地区太阳能光伏/光热-地源热泵联合供热系统运行性能模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(6): 1892-1900.
LIU X P, LEI Y H, TIAN D, et al. Numerical simulation for performance of solar photovoltaic/thermal-ground source heat pump hybrid heating system in hot summer and cold winter zone [J]. Journal of Central South University (science and technology), 2021, 52(6): 1892-1900.
- [6] 王海涛, 张季, 胡宁, 等. 光伏-土壤源热泵制热工况综合性能[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 195-202.
WANG H T, ZHANG J, HU N, et al. Comprehensive performance of PV/T-GCHPS under heating conditions [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(8): 195-202.
- [7] ZHENG Z H, ZHOU J, XU F, et al. Integrated operation of PV assisted ground source heat pump and air source heat pump system: performance analysis and economic optimization [J]. Energy conversion and management, 2022, 269: 116091.
- [8] WANG F, YOU T. Synergetic performance improvement of a novel building integrated photovoltaic/thermal-energy pile system for co-utilization of solar and shallow-geothermal energy [J]. Energy conversion and management, 2023, 288: 117116.
- [9] 李匡富. PV/T耦合地源热泵冷热电三联供系统模拟研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.
LI K F. Simulation study on PV/T coupled ground source heat pump combined cooling, heating and power system [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2022.
- [10] KAVIAN S, AGHANAJAFI C, JAFARI MOSLEH H, et al. Exergy, economic and environmental evaluation of an optimized hybrid photovoltaic-geothermal heat pump system [J]. Applied energy, 2020, 276: 115469.
- [11] LEE M, LEE D, PARK M H, et al. Performance improvement of solar-assisted ground-source heat pumps with parallelly connected heat sources in heating-dominated areas [J]. Energy, 2022, 240: 122807.
- [12] WANG W W, SUN Y G, MAJDI H S, et al. Multi-aspect investigation and multi-criteria optimization of a novel solar-geothermal-based polygeneration system using flat plate and concentrated photovoltaic thermal solar collectors [J]. Process safety and environmental protection, 2023, 174: 485-509.
- [13] REN X Y, WANG Z H, LI Y X, et al. Two-stage design model of SE-GSHP-CCHP system for coupled thermal energy storage considering optimal configuration and scheduling [J]. Journal of energy storage, 2025, 115: 115926.
- [14] NIEMELÄ T, MANNER M, LAITINEN A, et al. Computational and experimental performance analysis of a novel method for heating of domestic hot water with a ground source heat pump system [J]. Energy and buildings, 2018, 161: 22-40.
- [15] TERASHIMA K, SATO H, IKAGA T. PV/T solar panel for supplying residential demands of heating/cooling and hot water with a lower environmental thermal load [J]. Energy and buildings, 2023, 297: 113408.
- [16] 许抗吾, 魏俊辉, 孙林娜, 等. 基于地源热泵的多种辅助热源方案比较分析[J]. 建筑节能, 2023, 51(9): 73-79, 119.
XU K W, WEI J H, SUN L N, et al. Comparative analysis of multiple auxiliary heating source schemes based on ground-source heat pump [J]. Building energy efficiency, 2023, 51(9): 73-79, 119.
- [17] HG 20202—2014, 脱脂工程施工及验收规范[S].
HG 20202—2014, Code for construction and acceptance of degreasing project [S].
- [18] 曹英, 杨报军. 汽车涂装前处理主脱脂环节能耗分析[J]. 现代涂料与涂装, 2015, 18(11): 11-13.
CAO Y, YANG B J. Energy consumption analysis in the process of main degreasing in automotive coating [J]. Modern paint & finishing, 2015, 18(11): 11-13.
- [19] 张辰睿. 基于机器学习的短期电力负荷预测和负荷曲线聚类研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
ZHANG C R. Research on short-term power load forecasting and load curve clustering based on machine learning [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

STUDY ON OPTIMAL CONFIGURATION OF PV/T ASSISTED GROUND SOURCE HEAT PUMP DEFATTED HEATING SYSTEM

Shi Guohua¹, Li Haoran¹, Lei Xu¹, Fang Yuhan²

(1. *Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;*

2. *College of International Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*)

Abstract: To address the high energy consumption and significant carbon reduction challenges in steel plate degreasing for industrial equipment manufacturing, this study proposes a novel PV/T-coupled ground-source heat pump heating system for degreasing (PV/T-GSHPHD) and its corresponding operational strategy. A comprehensive energy conversion model was established for system components, and an optimization configuration model was developed to enhance economic efficiency while ensuring soil thermal balance through typical scenario clustering analysis. The optimal system components and their respective capacities were determined based on these models. Results show that the optimal PV/T-GSHPHD system configuration consists of a PV/T module, a ground-source heat pump, a heat collection tank, and a thermal storage tank, with soil heat supplementation achieved via the PV/T module. Compared to a conventional electric boiler heating system, the PV/T-GSHPHD achieves 69.1% reduction in annual heating costs and 83.3% reduction in environmental costs, demonstrating significant economic and environmental advantages. The analysis of operating characteristics of the system on typical days indicates that the PV/T-GSHPHD effectively reduces grid peak loads year-round, with only 13% of its equivalent electricity sourced from the grid during summer, thereby alleviating regional electricity supply pressures. This study highlights the technical and economic viability of PV/T-GSHPHD as a sustainable alternative for industrial degreasing heating applications.

Keywords: industrial heating; clean heating; photovoltaic/thermal; ground source heat pump; configuration optimization; scene clustering