

基于模糊推理的碟式太阳能跟踪系统改进研究

朱正林¹, 吴 昊², 宋汉梁¹, 郑 健³

(1. 南京工程学院能源与动力工程学院, 南京 211167; 2. 国网江苏省扬州市供电有限公司, 扬州 225100;
3. 国网江苏省高邮市供电有限公司, 高邮 225600)

摘 要: 在碟式太阳能系统的长期实验数据中发现, 太阳辐照度较低时系统集热效率非常低。为使碟式太阳能系统始终运行在高集热效率状态, 提出模糊推理方法改进跟踪系统的启停判定条件, 并根据集热器出口气流温度的影响因素建立模糊推理系统。仿真结果表明模糊系统在已知太阳辐照度、辐照变化度和空气流量的前提下, 可智能控制系统在集热效率高时运行, 集热效率低时待机, 证明了该方法的可行性和有效性。

关键词: 碟式太阳能; 跟踪控制系统; 模糊推理; 隶属度函数

中图分类号: TM615

文献标志码: A

0 引 言

碟式太阳能作为光热发电中效率最高的方式之一, 具有较大的发展潜力, 其跟踪控制系统是碟式太阳能的关键部分, 跟踪控制技术经过近几年的研究得到快速发展, 主要分为单轴跟踪和双轴跟踪。单轴跟踪常用于槽式太阳能跟踪系统中, 而双轴常用于光伏太阳能跟踪系统中。由于上述两者商业化程度较高, 两者的跟踪控制系统研究则较为成熟。

Shanmugam 等^[1]提出在南北方向上间断跟踪太阳的方法, 而在东西方向上不跟踪, 以减少能量的消耗。Neagoe 等^[2]提出一种新型的日间定位高精度跟踪系统, 该系统集成了一种由电动直线执行器驱动的二自由度并联机构, 并提出一种用于优化 2 种电动直线执行器驱动程序的运动学和静态方法, 仿真结果证实了新的跟踪系统概念的可行性。彭长清等^[3]在 PID 控制和自适应模糊 PID 的仿真模型下, 分析不同扰动信号作用下的响应特性, 结果表明, 自适应模糊 PID 控制下的系统具有良好的精度、抗干扰性和稳定性。尤力等^[4]研制一种碟式太阳能的自动跟踪系统, 其利用 PSD 传感器获取太阳位置, 并通过 ARM7 控制器控制转台。李斌^[5]利用 STM32 微处理器作为主控芯片, 其具有响应速度快、稳定性高、功耗低的特点, 提高了系统的效率及可靠性。王林军等^[6]提出一种基于 PLC 的全天候自动跟踪方式, 利用光照强度作为切换跟踪方式的依据, 消除了程序跟

踪的累计误差, 也避免了传感器在多云天气无法工作的问题。但是, 碟式太阳能跟踪控制系统很多均由光伏跟踪系统改进而来, 并未考虑碟式太阳能运行中的问题。本文以实测数据为依据, 重点阐述碟式太阳能跟踪系统运行中的问题, 并提出方法加以改进。

1 传统跟踪系统问题

本文以南京工程学院的碟式太阳能实验台作为研究对象, 其集热器工作介质为空气, 采用直接跟踪传感器进行太阳跟踪^[7], 根据系统采集的实际数据, 定性定量分析传统跟踪系统的问题。

取 1 年中的 6 个典型日的太阳辐照度与集热器出口气流温度的相关数据进行对比分析, 如图 1 所示。其中, 图 1a~图 1d 分别由 3 月 19 日(春季)、6 月 17 日(夏季)、9 月 20 日(秋季)、12 月 22 日(冬季)4 个典型日中 08:00~18:00 之间数据采集系统采集的实际数据绘制而成, 且均为晴天。图 1e、图 1f 是 6 月 10 日(阴天)和 5 月 16 日(多云)08:00~18:00 之间监控系统采集的实际数据。为便于对比, 进行实验时保持进入集热器的空气流量相同。

对比图 1a~图 1d 发现: 当空气流量相等时, 集热器的出口气流温度和太阳辐照度根据季节的不同, 差异较大。在辐照度较低时, 集热器出口气流温度较低, 系统的整体效率也低。其原因主要是太阳辐照度很低, 几乎无聚焦光斑, 导致系统集热效率较低。若长时间出现这种现象, 系统应进入待机状态。

收稿日期: 2018-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(51706093); 南京工程学院科研基金(ZKJ201605)

通信作者: 朱正林(1971—), 男, 博士、副教授, 主要从事新能源发电及应用方面的研究。8115403@qq.com

对比图 1b 和图 1e, 可比较出同季节阴天和晴天的系统工作状态的差别。由于在阴天状态下的太阳辐照度偏低且变化幅度较小, 也几乎无聚焦光斑。这种情况下, 跟踪系统也应进入待机状态。特殊的, 如图 1f, 多云天气下, 在太阳被云层挡住的时间内, 集热器出口气

流温度会短暂下降。但由于太阳被云层挡住的时间较短, 此时系统待机并不合适。

因此, 针对碟式太阳能在辐照度较低和多云天气下的特殊性, 以单一时间因素来判断系统是否启停并不可取, 需对跟踪系统的数据处理和判断方法进行改进。

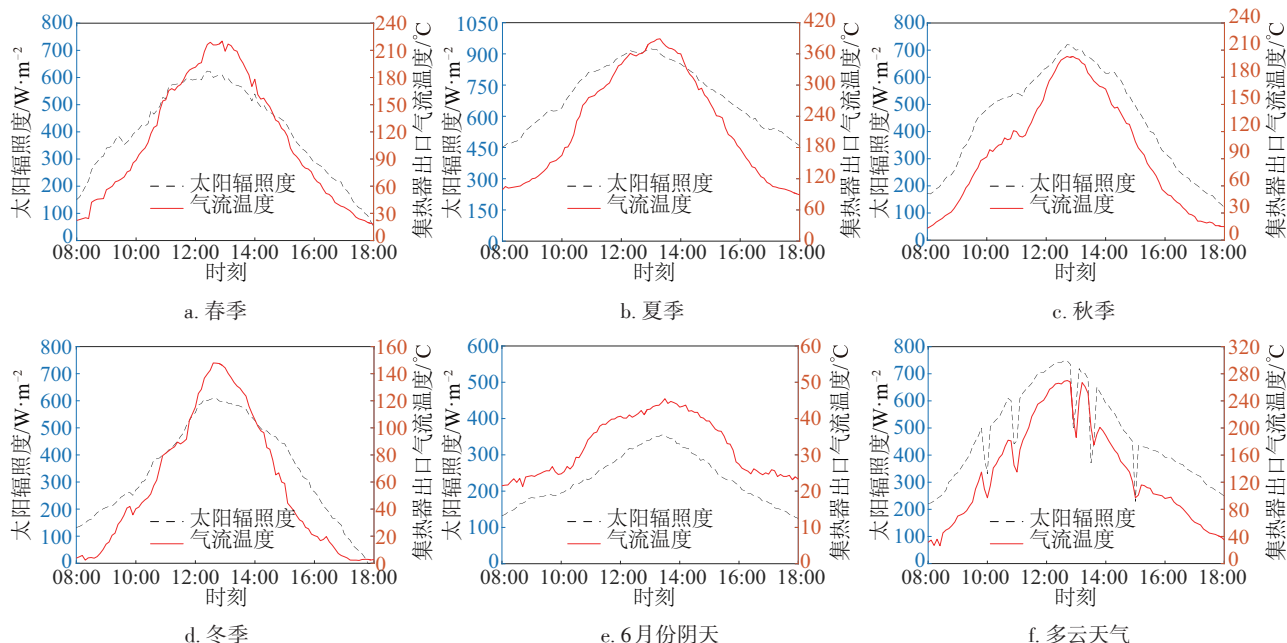


图1 6个典型日的太阳辐照度与集热器出口气流温度关系

Fig. 1 Relationship between exit air temperature and solar irradiance of six typical days

2 跟踪系统改进

为了使系统始终运行在高效率状态, 本文建立了一套基于模糊推理方法的智能判定系统启动和停机的系统。根据太阳辐照度、辐照变化度和空气流量等多种因素的相互关系, 使用模糊推理, 判断出口气流温度和系统应当处于的状态, 从而控制系统智能开启, 使系统始终运行于集热效率较高的状态。

2.1 模糊推理原理

模糊逻辑是一种处理近似而非精确的数学工具。它摒弃了原有的二值逻辑简单的肯定或否定, 把客观逻辑世界看成是具有连续灰度等级变化的, 允许一个命题存在部分肯定和部分否定, 只不过是隶属程度不同而已^[8]。根据 Zade 著名的“不相容定理”, 随着系统复杂性的增加, 人们对其进行精确描述的能力下降, 直至达到这样一个界限, 即精确地描述失去意义。由于在人机工效领域中存在主观的不确定性决策过程, “模糊”描述对于那些无法进行精确分析的问题提供了新的解决方法。

本文跟踪系统的模糊推理改进结构图如图 2 所

示。首先确定输入和输出隶属度函数和输入输出变量的变化范围, 然后将输入变量和输出变量进行模糊化处理, 同时设置模糊规则对输入和输出变量进行评分, 完成后对变量进行去模糊化, 使得变量的隶属度有一个直观表现, 利于判断输入输出变量的权重, 最后通过去模糊化的变量输出结合判定规则对系统的状态进行判定, 并通过计算机下达指令对系统的运行状态进行控制。

2.2 影响因素分析

为正确推理出系统运行效率, 应该先确定集热器出口气流的影响因素, 将适当的影响因素纳入模糊推理系统的输入。

根据图 1 可知, 出口气流温度随太阳辐照增强而升高, 每一时刻的出口气流温度与该点太阳辐照度具有高相关性。因此, 太阳辐照是出口气流温度的主要影响因素。大气中风速具有不确定性, 但其一般只影响跟踪系统所承载的风荷载值, 再加上集热器和送风管道的密封和较好保温措施, 环境风速对集热器的出口气流温度影响较小, 可不予考虑。

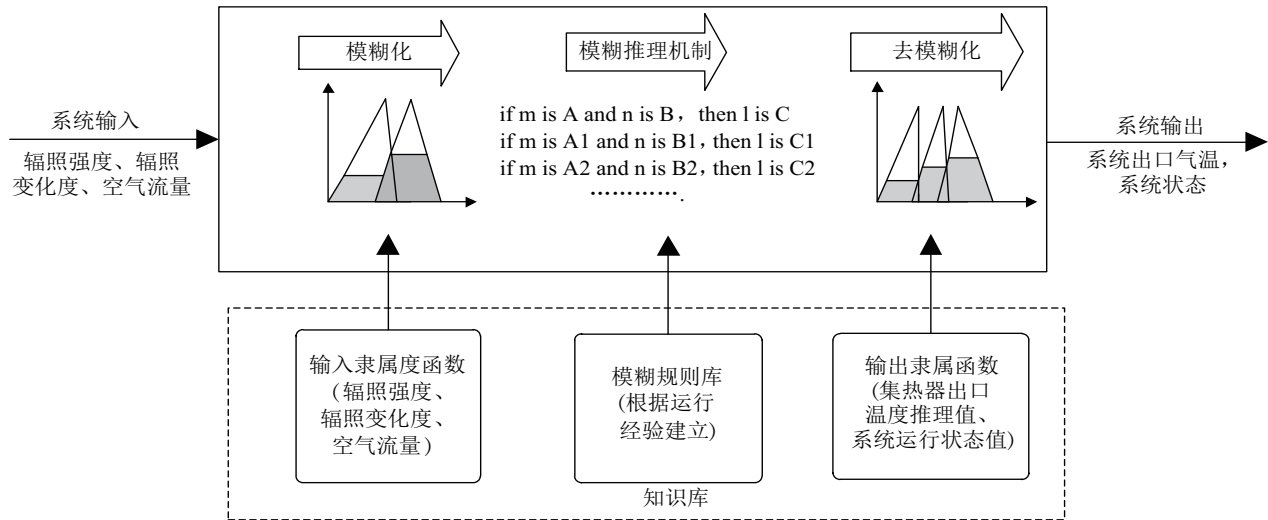


图2 模糊推理结构图

Fig. 2 Fuzzy reasoning structure diagram

空气流量对集热器出口气流温度的影响不可忽略。其原因是当送风管道中的空气流量较大时,其吸热量也较多,从而影响集热器出口温度。表1是碟式光热系统晴天时空气流量及集热器出口气流温度的数据。分析可知,在太阳辐照变化范围相同时,在空气流速增大的情况下,出口气流温度下降。因此,空气流速对气流温度有一定影响。

根据图1e,由于在阴天条件下,太阳辐照度变化较晴天时小得多,减小了辐照度对于出口气流温度的影响。根据出口气流的数据可知,其温度变化值大致等于大气温度的变化值。夏季和冬季气温相差大致30℃,比较图1b和图1d可知,在辐照度差不多的区域,集热器出口气流温度的差值也约为30℃,不论辐射度高低,汽流的温升大致相等,但出口温度的变化相对较小。所以,认为大气温度的上升对于集热器出口气流温度有一定影响,但影响较小。

表1 碟式太阳能集热器热特性数据表

Table 1 Data table of thermal characteristics of dish solar collector

组号	太阳辐照度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	空气流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	气流 温度/℃
1	351.60~2599.93	8.26	272.19~337.79
2	606.90~723.86	8.26	312.18~417.83
3	623.12~775.11	10.08	258.28~365.50

2.3 模糊推理系统建立

影响碟式太阳能系统效率的因素较多,本文以太阳

辐照度、空气流量作为系统的输入,以集热器出口气流温度和跟踪系统运行状态为模糊系统的输出。与此同时,考虑到在多云天气下,太阳光被云层短暂遮挡会导致集热器在短时间内收集不到大量太阳能,但此时不应改变系统的状态,而应采用视日轨迹跟踪继续跟踪。因此,为防止多云状态下系统的误判,在建立模糊推理系统时,加入太阳辐照变化度作为输入。

根据长期运行经验,太阳辐照度的变化区间为 $[0, 1000]$,其属于主值区间结构,但无明显的特征元素,因此选择太阳辐照度隶属度函数为梯型分布。如图3a所示。

太阳辐照变化度的变化区间设置为 $[0, 1000]$,其属于主值区间结构,但因其没有明显的特征元素,隶属度函数亦选为梯型分布,如图3b所示。

空气流量的变化区间设置为 $[0, 20]$,其属于主值区间分布特性,即在低流量状态下,数值0具有明显特征;在高流量状态下,数值20具有明显特征。因此,其隶属度函数选择为正态分布,如图3c所示。

输出量方面,根据长期运行经验,出口气流温度属于主值区间结构,但因其没有明显的特征元素,因此选择集热器出口气流温度的隶属度函数为梯型分布。集热器出口气流温度的变化区间设置为 $[0, 700]$,其隶属度函数选择为梯型分布,如图3d所示。

系统运行状态变化区间设置为 $[0, 10]$,其属于主值区间分布特性。在待机状态下,数值2.5具有明显的特征的;在运行状态下,数值7.5具有明显特征。因此,其隶属度函数选择为三角型分布,如图3e所示。

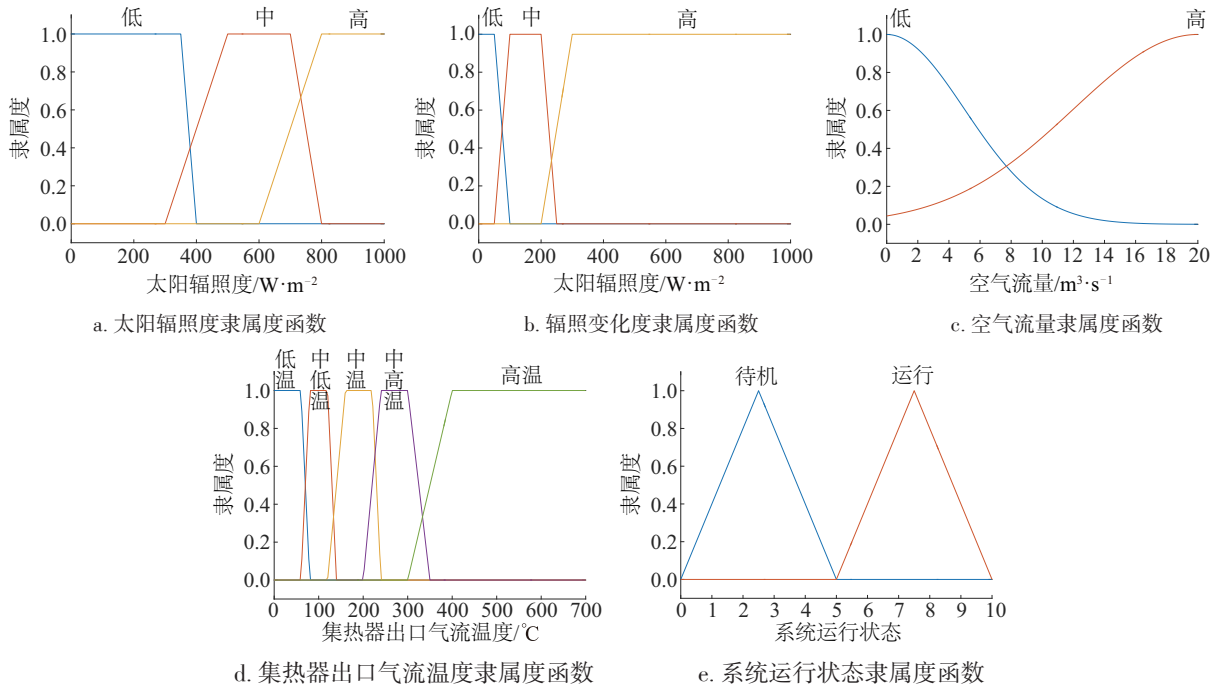


图3 输入输出变量的隶属度函数

Fig. 3 Membership function of input and output variables

设置好输入输出的隶属度后,设置该模糊系统的模糊规则。

在晴天时,太阳辐照度可处于高、中状态,而辐照变化度一定处于低状态。模糊规则为:

1) If (太阳辐照度 is 高) and (辐照变化度 is 低) and (空气流量 is 低) then (集热器出口气流温度 is 高温)(系统运行状态 is 运行)

2) If (太阳辐照度 is 高) and (辐照变化度 is 低) and (空气流量 is 高) then (集热器出口气流温度 is 中高温)(系统运行状态 is 运行)

3) If (太阳辐照度 is 中) and (辐照变化度 is 低) and (空气流量 is 低) then (集热器出口气流温度 is 中温)(系统运行状态 is 运行)

4) If (太阳辐照度 is 中) and (辐照变化度 is 低) and (空气流量 is 高) then (集热器出口气流温度 is 中温)(系统运行状态 is 运行)

在阴天时,太阳辐照度一定处于低状态,而辐照变化度一定处于低状态。根据3个输入状态,得到的模糊规则为:

5) If (太阳辐照度 is 低) and (辐照变化度 is 低) and (空气流量 is 低) then (集热器出口气流温度 is 低温)(系统运行状态 is 待机)

6) If (太阳辐照度 is 低) and (辐照变化度 is 低) and (空气流量 is 高) then (集热器出口气流温度 is 低

温)(系统运行状态 is 待机)

在多云天气时,太阳辐照度一定处于3个状态中的任意状态,而辐照变化度一定处于中或者高状态。根据3个输入状态,得到的模糊规则为:

7) If (太阳辐照度 is 低) and (辐照变化度 is 中) and (空气流量 is 低) then (集热器出口气流温度 is 中低温)(运行状态 is 待机)

8) If (太阳辐照度 is 中) and (辐照变化度 is 中) and (空气流量 is 低) then (集热器出口气流温度 is 中高温)(运行状态 is 运行)

9) If (太阳辐照度 is 高) and (辐照变化度 is 中) and (空气流量 is 低) then (集热器出口气流温度 is 中高温)(运行状态 is 运行)

10) If (太阳辐照度 is 低) and (辐照变化度 is 高) and (空气流量 is 低) then (集热器出口气流温度 is 中低温)(运行状态 is 运行)

11) If (太阳辐照度 is 中) and (辐照变化度 is 高) and (空气流量 is 低) then (集热器出口气流温度 is 中温)(运行状态 is 运行)

12) If (太阳辐照度 is 高) and (辐照变化度 is 高) and (空气流量 is 低) then (集热器出口气流温度 is 中高温)(运行状态 is 运行)

13) If (太阳辐照度 is 低) and (辐照变化度 is 中) and (空气流量 is 高) then (集热器出口气流温度 is 低

温)(运行状态 is 待机)

14) If (太阳辐照度 is 中) and (辐照变化度 is 中) and (空气流量 is 高) then (集热器出口气流温度 is 中低温)(运行状态 is 运行)

15) If (太阳辐照度 is 高) and (辐照变化度 is 中) and (空气流量 is 高) then (集热器出口气流温度 is 中温)(运行状态 is 运行)

16) If (太阳辐照度 is 低) and (辐照变化度 is 高) and (空气流量 is 高) then (集热器出口气流温度 is 中低温)(运行状态 is 运行)

17) If (太阳辐照度 is 中) and (辐照变化度 is 高) and (空气流量 is 高) then (集热器出口气流温度 is 中温)(运行状态 is 运行)

18) If (太阳辐照度 is 高) and (辐照变化度 is 高) and (空气流量 is 高) then (集热器出口温度 is 中温)(运行状态 is 运行)

因重心法的鲁棒性较强,且使用较多,本文在划分输入输出量、确定隶属度函数以及制定模糊规则 3 个步骤的基础上,采用重心法去模糊化。最终,建立一个可用 3 个输入量模糊推理出集热器出口气流温度和系统状态的模糊推理系统。

3 仿真及结果分析

为证明模糊推理系统的有效性,利用仿真手段对模糊推理规则做定量分析。

基于建立的模糊推理系统,本文根据实验数据,分别仿真出图 1 所示 6 种天气所对应的集热器出口气流温度和系统运行状态的选择,仿真结果如图 4 所示。其中,虚线表示集热器出口气流温度的实际值,直线表示模糊系统仿真出的系统运行状态值。当运行状态值大于 5 时,系统处于开启状态;相反,系统处于待机状态。

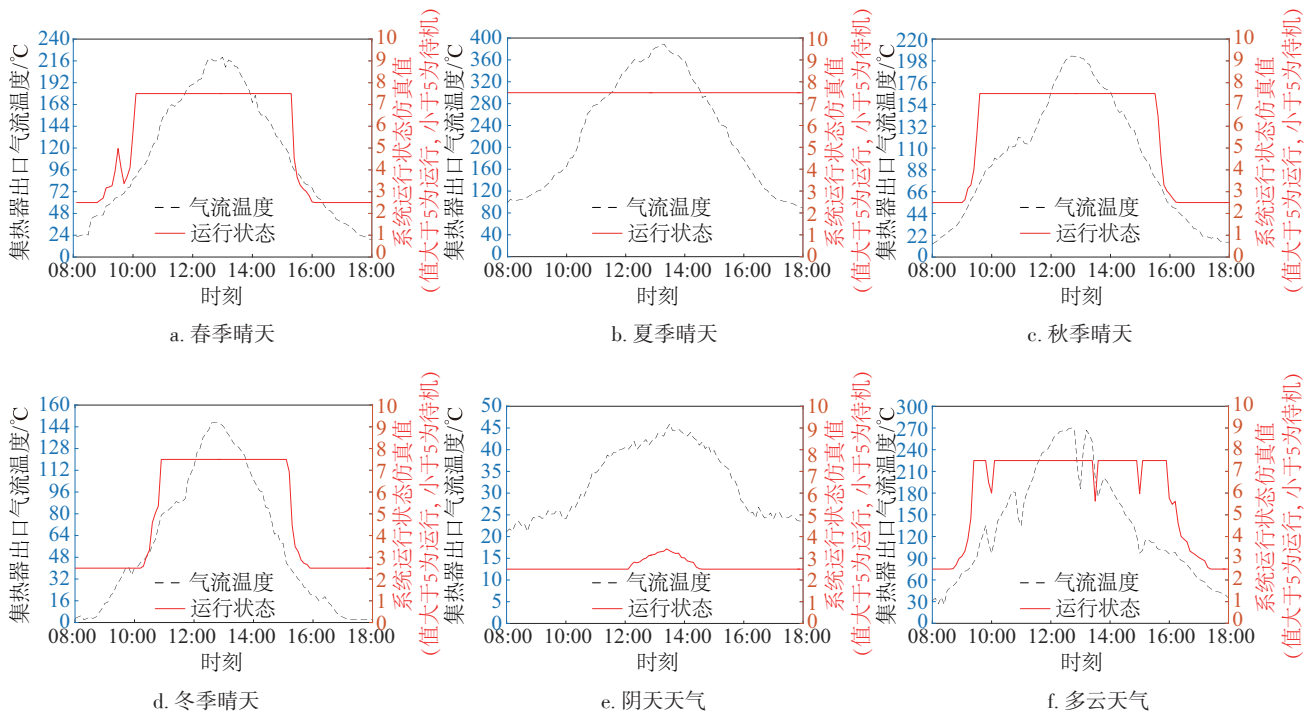


图4 6种典型日的模糊推理系统仿真结果

Fig. 4 Simulation results of six typical day fuzzy reasoning systems

分析图 4a、图 4c 可知,在春秋季节晴天时,跟踪系统在 10:00~16:00 辐照强度大,热效率较高,系统一直处于开启状态。由图 4b 可知,在夏季晴天时,08:00~18:00 辐照强度大,模糊系统仿真出跟踪系统应当一直处于开启状态。而根据集热器出口气流温度的数据来看,其温度均大于 80 °C,而夏季的平均大气温度为 30 °C,气流的温升约为 50 °C,这表明系统收集到的太阳能量较多。

由图 4d 可知,在冬季晴天时,跟踪系统在 11:00~15:30 开启,此时段热效率高,系统应开启。

由图 4e 可知,在阴天时,跟踪系统应当全天处于待机状态。在此期间,采集的集热器出口气流温度数据均在 50 °C 以下,可见系统收集到的太阳能量较小。由图 4f 可知,在初夏多云天气时,跟踪系统在 09:00~16:30 开启。在此期间,集热器出口气流温度也均在 70 °C 以

上,系统收集到的太阳能量多。特殊地,在辐照度降低的情况下,系统运行状态仿真值有所降低,但其值均大于 5,系统还应处于运行状态。这是由于将辐照变化度纳入模糊系统输入,可根据该输入的实际数据,判断出此时的集热器出口气流温度依旧较高,从而使系统不至于因短期的辐照度下降而待机。

4 实验分析

表 2 是随机取 16 组数据采用模糊推理系统得出的结果,分别表示使用模糊推理规则时集热器出口气流温度的推理值和系统运行状态值。其中,太阳辐照度为 3 min 内采集的太阳辐照度之间的标准差。

表 2 模糊推理系统仿真结果

Table 2 Simulation results of fuzzy reasoning system

辐照度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	辐照变化/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	状态值	系统 状态
947	38.5	7.42	461	7.5	运行
785	22.3	5.32	395	7.5	运行
629	38.5	7.42	369	7.5	运行
751	25.6	15.63	241	7.5	运行
265	38.5	7.42	36.7	2.5	待机
185	15.7	5.32	35	2.5	待机
265	146	7.42	68.8	2.5	待机
629	146	7.42	237	7.5	运行
947	146	7.42	275	7.5	运行
525	434	7.42	183	7.5	运行
278	135	5.68	72	2.5	待机
629	146	15.6	148	7.5	运行
947	172	15.6	185	7.5	运行
265	454	15.6	99.4	7.5	运行
629	412	15.6	185	7.5	运行
576	120	5.6	195	7.5	运行

表 2 中第 1~4 组数据表示晴天情况。在晴天时,太阳辐照度处于高和中状态,且短时间内辐照度变化较小。经模糊系统推理,系统应处于运行状态。第 5 和第 6 组数据表示阴天情况。在阴天时,太阳辐照度处于低辐射状态,且短时间内辐照度变化也较小,系统应处于待机状态,同时,当长时间多云天气时,系统也可判断为阴天。然而,改进前的系统则在阴天处于运行状态。第 7~16 组数据表示多云天气的情况。在多云天气下,太阳辐照度会短时间内降低,当辐照度可能处于高状态或

者中状态时,说明太阳不被云层挡住时辐射度很高,此时不应当因辐照度短时的降低而让系统待机。特殊地,如表中第 10、14 组数据所示,辐照变化度较高,说明此时有短暂云层遮挡阳光现象,在阳光未被遮挡时,辐照度依旧较高,所以,系统应一直处于运行状态。相反,如表中第 7 和 12 组数据所示情况,当辐照度较低而变化度也处于中状态时,说明太阳未被遮挡且辐照度较低。此时,应判断系统处于待机状态,等待太阳辐照度升高至合理值时,再进入运行状态。然而,改进前的系统在此情况下一直处于运行状态。

综合以上 16 组数据的分析结果表明,模糊推理仿真结果基本反映了辐照度、辐照度变化、空气流量以及温度的相互关系对碟式实验台运行状态的影响,也反映了天气状态对碟式太阳能集热器系统运行状态的影响。说明该模糊推理系统能够对碟式太阳能实验台的运行提供指导,保证实验台的安全和高效运行。

5 结 论

本文根据碟式太阳能系统的实际运行数据,发现在太阳辐照度较低时系统集热效率非常低的问题。通过分析影响系统集热效率的相关因素,提出一种基于模糊推理方法的太阳自动跟踪控制启停策略。依据模糊推理的数学原理,分别对输入(辐照强度、辐照变化度和通入空气量)隶属度函数和输出(出口气温和运行状态)隶属度函数的相关参数进行了设置,在确定模糊推理规则的基础上,建立了基于外部环境因素和系统内部参数判断的模糊推理系统。根据跟踪系统的实际情况,利用仿真技术进行相关计算。其结果证明了模糊推理方法的可行性和有效性,可保证碟式太阳能集热系统高效运行。

[参考文献]

- [1] SHANMUGAM S, CHRISTRAJ W. The tracking of the sun for solar paraboloidal dish concentrators [J]. Journal of solar energy engineering, 2005, 127(1): 156-161.
- [2] NEAGOE M, VISA I, CRETESCU N, et al. On a new parallel tracking system for accurate orientation of concentrated solar convertors [J]. Applied mechanics & materials, 2014, 658: 105-110.
- [3] 彭长清, 彭佑多, 胡燕平, 等. 大功率单碟式太阳能聚光器跟踪控制系统研究及实现[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版) 2012, 27(3): 28-34.
PENG C Q, PENG Y D, HU Y P, et al. Research and

- implementation of high power single-dish solar concentrator tracking control system [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (natural science edition), 2012, 27(3): 28-34.
- [4] 尤力, 周建江. 用于碟式太阳能聚能器的太阳自动跟踪系统研制[J]. 信息化研究, 2011, 37(1): 9-11.
YOU L, ZHOU J J. Development of solar automatic tracking system for dish solar energy accumulator [J]. informatization research, 2011, 37(1): 9-11.
- [5] 李斌. 碟式斯特林太阳能热发电系统中跟踪系统的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2013.
LI B. Research on tracking system in dish Stirling solar thermal power system [D]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology University, 2013.
- [6] 王林军, 门静, 许立晓, 等. 基于 PLC 的碟式太阳自动跟踪控制系统研究[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 274-278.
- WANG L J, MEN J, XU L X, et al. Research on automatic sun tracking control system based on PLC [J]. China journal of agricultural mechanization, 2015, 36(3): 274-278.
- [7] 朱正林, 郑健, 吴昊. 碟式太阳能直接跟踪传感器设计及其应用[J]. 太阳能学报, 2016, 37(9): 2271-2277.
ZHU Z L, ZHENG J, WU H. Design and application of dish solar direct tracking sensor [J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(9): 2271-2277.
- [8] 李国勇. 智能预测控制及其 Matlab 实现[M]. 第 2 版, 北京: 电子工业出版社, 2010.
LI G Y. Intelligent predictive control and its Matlab implementation [M]. The second edition, Beijing: Electronic Industry Press, 2010.

RESEARCH ON IMPROVEMENT OF DISH SOLAR ENERGY TRACKING SYSTEM BASED ON FUZZY REASONING

Zhu Zhenglin¹, Wu Hao², Song Hanliang¹, Zheng Jian³

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. State Grid Jiangsu Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 225100, China;

3. State Grid Jiangsu Gaoyou Power Supply Company, Gaoyou 225600, China)

Abstract: In the long-term experimental data of dish solar system, it is found that the heat collection efficiency of the system is very low when the solar irradiance is low. In order to keep the dish solar system running in the state of high heat collection efficiency, a fuzzy reasoning method is proposed to improve the starting and stopping judgment conditions of the tracking system. The simulation results show that the fuzzy system can make the system operate intelligently when the heat collection efficiency is high and standby when the efficiency is low.

Keywords: dish solar energy; tracking control system; fuzzy inference; membership function