

王思文,王文琪,侯静. 基于主动蓄热循环系统的温室性能试验研究[J]. 江苏农业科学,2018,46(20):264-268.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.20.067

基于主动蓄热循环系统的温室性能试验研究

王思文,王文琪,侯静

(内蒙古建筑职业技术学院机电与暖通工程学院,内蒙古呼和浩特 010070)

摘要:为了提高冬季夜间温室温度,提出将温室白天得到的热量储存到后墙墙体中,采用风机实现蓄热放热过程,风机所需电量可由光伏系统提供。基于北京的天气,2种情况下均安装地面面积为 272 m^2 的温室,以保持温室维持在较高的温度下。试验结果表明,主动蓄热系统所产生的温室平均气温在 $10.9\sim 14.8\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,平均值为 $12.09\text{ }^\circ\text{C}$ 。参考温室中的气温在 $3.4\sim 10\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,平均值为 $6.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。室外温度比室内温度低约 $16.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。电力供暖和天然气供暖系统供暖成本比主动蓄热系统分别高 267.8% 和 53.6% ,煤炭供暖成本比主动蓄热系统低 28.2% 。主动蓄热系统采暖能够作为化石能源供暖的替代技术。

关键词:主动蓄热系统;温室供暖;空气调节供暖;热经济指标

中图分类号:S625.5⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)20-0264-04

过去30年来,温室在农业生产中的使用大幅增加。使用温室的主要目的是延长栽培季节并获得高产优质农产品。只有当室内温度控制在最佳范围内时,这些目标才有可能实现。加热是在寒冷天气条件下维持温室气温的重要措施^[1-3]。为了减少温室供热的能源消耗(尤其是化石燃料的使用),并提高作物生长的可持续性,人们相当重视新型和可再生能源作为温室取暖的替代手段。此外,从节能角度来看,经济型储热系统及相关设备的高效开发与新型可再生能源的开发同样重要。对于采用传统燃料的封闭式供热应用来说,后墙主动蓄热是一种有吸引力且价格较低的替代方案。

传统的日光温室是一种被动的太阳能围护系统,对加热过程几乎没有人为干预。这种温室中的所有传热过程都是自我调节的。与被动加热相比,主动蓄能,再利用机械装置(循环泵、风扇等)和材料(制冷剂、水、空气、砾石等热介质)改变传热和捕集过程可以提高能源利用率。我国太阳能温室主要位于北方($32^\circ\text{N}\sim 41^\circ\text{N}$)。大多数温室均是采用被动能量储存和释放的机制,其中北墙在白天拦截辐射能量并储存温室内部搜集的能量,并在夜晚进行释放。通过这种被动能量传输和夜间高绝缘的温度特性,即使在室外温度为 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 的寒冷夜晚,温室也不会结霜,但夜间温室气温将下降至 $6\sim 10\text{ }^\circ\text{C}$ ^[4-5]。荷兰高产番茄生产要求夜间温度不低于 $18\text{ }^\circ\text{C}$ ^[6-8],但在没有任何辅助供暖系统的情况下,大多数中国种植者推荐 $8\text{ }^\circ\text{C}$ 作为临界夜温用于温室中的番茄种植。由于温室的气候控制能力有限,特别是在寒冷的冬季夜晚,要满足水果、蔬菜和花卉生产的最佳温度要求是不可能的^[9-11]。

为了改善收集和释放热量结果,开发了一种低价格的主

动储热系统,并研究了利用该系统的温室热性能。主动蓄热系统的主要组件是后墙蓄热体以及风机,作为传热介质的空气能够通过风机在温室内与蓄热后墙之间循环。

1 材料与方法

1.1 温室和主动太阳能热储存释放

选取呼和浩特市($40^\circ\text{N}, 111^\circ\text{E}$)进行温室试验研究,以确定主动蓄热系统对温室的影响。温室东西向,长 34 m ,宽 8 m 。脊高为 3.8 m ,北壁的高度为 2.6 m 。北墙作为主动蓄热墙。在试验期间种植番茄。表1给出了温室的结构参数。

表1 温室结构参数

部分	施工和覆盖材料	面积 (m^2)
北墙	2块 10 mm 厚的纤维水泥板与 100 mm 厚的聚苯乙烯泡沫	85
西墙和东墙	240 mm 黏土砖+ 100 mm 聚苯乙烯泡沫+ 120 mm 黏土砖+ 10 mm 瓷砖	46
北屋顶	2块 20 mm 厚纤维水泥板之间有1块 150 mm 的聚苯乙烯板	51
南屋顶	0.08 mm 厚的透明PVC薄膜覆盖着 20 mm 的聚乙烯泡沫保温层	277
地板	裸土	272
框架结构	钢骨架	

当主动蓄热系统在夜晚工作时,由4个风机组成的送风系统,强制将蓄热墙体内部与温室空气进行热交换,白天将温室热量蓄入墙体中,晚上墙体中的热量加热温室空气^[12-14]。

使用T型热电偶测量温度(精度为 $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$)。将3个受蓄热墙体辐射的空气温度传感器放置在距离北墙 $2.4, 4, 6\text{ m}$ 、高度 1.5 m 的温室中间。采用型号为CMP3、测量范围为 $0\sim 2000\text{ W}/\text{m}^2$ 、光谱范围 $300\sim 2800\text{ nm}$ 、精度 $\pm 0.5\%$ 的辐照表,测量与北墙垂直的太阳辐射,高度为 1.5 m 。所有温度和太阳辐射水平均使用CR1000数据记录器以 10 min 的间隔记录。使用环境传感器(准确度: $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$, RH: $\pm 2.5\%$)测量

收稿日期:2018-02-24

基金项目:内蒙古自然科学基金(编号:2015MS0545);2018年内蒙自治区人才开发基金“多效管式太阳能苦咸水淡化系统热物理问题研究”。

作者简介:王思文(1984—),女,内蒙古巴彦淖尔人,硕士,讲师,从事暖通专业研究。E-mail:y6q40o@163.com。

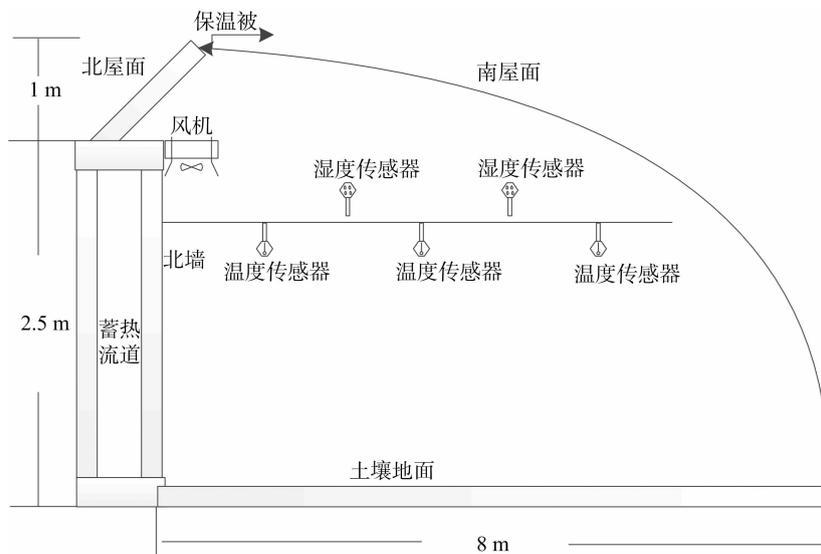


图1 主动蓄热温室结构示意图

室外空气温度。使用电能表来测量水泵的电力消耗。

1.2 测试方法

在 0、10、20、30、40 °C 的温度下,使用低温罐校准热电偶。环境传感器在空气温度为 -20、-10、0、10、20、30、40 °C 时使用 Assmann 吸气干湿表。

在特定时刻温室收集的热量由下式给出:

$$Q_c = \rho_w C_w v_w (T_o - T_i) \quad (1)$$

式中: Q_c 是收集的瞬时热量, W; ρ_w 是水的密度, kg/m^3 ; C_w 是水的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; v_w 是系统的风机流量, m^3/s ; T_i 和 T_o 分别是主动蓄热系统的入口和出口处的温度, °C。

在时间段 τ 期间温室收集的总能量 E_c (J) 是:

$$E_c = \sum_{\tau} Q_c \tau \quad (2)$$

瞬时释放的能量 Q_r (W) 是:

$$Q_r = \rho_w v_w C_w (T_i - T_o) \quad (3)$$

期间 τ 释放的总热量 E_r (J) 为:

$$E_r = \sum_{\tau} Q_r \tau \quad (4)$$

主动蓄热系统的瞬时热效率被定义为即时收集的热能与可用太阳辐射的比率:

$$\eta_c = \frac{Q_c}{A_c I_c} = \frac{\rho_w v_w C_w (T_o - T_i)}{A_c I_c} \quad (5)$$

A_c 表示温室系统的有效集热面积, m^2 ; I_c 表示与北墙表面垂直的太阳辐射强度, W/m^2 。由于收集的能量等于从收集器到温室的热损失中减去吸收的辐射能量,方程(5)可写为:

$$\eta_c = a - \frac{k_c (T_{\text{plate}} - T_g)}{I_c} \quad (6)$$

式中: a 是温室表面围护结构的吸收率,无量纲; k_c 是围护结构与空气之间的总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_{plate} 是平均板温度, °C。

期间 τ 的平均效率为:

$$\eta_c = \frac{E_c}{E_s} = - \frac{E_c}{\sum S_c I_c \tau} \quad (7)$$

式中: E_s 是期间 τ 达到的太阳能总量(J)。

蓄热墙的能量平衡由空气的流入和流出以及热损失

给出:

$$V \rho_w C_w = v_w \rho_w C_w (T_o - T_w) \quad (8)$$

式中: V 是蓄热墙体积, m^3 ; T_o 是从蓄热墙入口到出口的平均温度, °C; T_{tank} 是后墙内部的平均温度, °C。本研究忽略了良好隔热水箱的热损失。

使用欧拉正向方法,可以从时间 τ 的温度计算 $\tau + \Delta\tau$ 时刻的后墙内部温度:

$$T_{\text{tank}, \tau + \Delta\tau} - T_{\text{tank}, \tau} = \frac{v_w}{V} (T_o - T_{\text{tank}}) \Delta\tau \quad (9)$$

墙体的能量平衡基于以下等式与温室顶相关联:

$$V \rho_w C_w \frac{dT_{\text{tank}}}{d\tau} = a A_c I_c - k_c A_c (T_{\text{plate}} - T_g) \quad (10)$$

1.3 主动蓄热系统的经济性能

性能系数(COP)是系统释放的能量 E_r 与系统的能量消耗 E_{con} (风机耗电)的比值:

$$\text{COP} = \frac{E_r}{E_{\text{con}}} \quad (11)$$

风机的功耗是系统唯一的能源消耗 E_{con} 。

$$E_{\text{con}} = W_p \tau_p \quad (12)$$

式中: W_p 是水泵的电功率, W; τ_p 是水泵总运行时间, s。

对主动蓄热系统的经济性能进行了分析,并基于与主动蓄热系统相同的能源投入和试验期间获得的当地能源价格(电力、煤炭和天然气),与呼和浩特温室采暖中普遍采用的3种传统供热系统进行了比较。主动蓄热系统和其他供热系统的采暖成本使用公式(13)、(14)、(15)计算:

$$E_x = \frac{E_r}{Co_x CV_x} \quad (13)$$

$$CH_x = E_x P_x \quad (14)$$

$$CH_{x,d,A} = \frac{CH_x}{A_g D} \quad (15)$$

式中: E_x 是供热系统 x 消耗的等价能量,由于在试验温室中为主动蓄热系统,燃煤供热系统(CFH)单位为 kg,燃气加热系统(GFH)单位为 m^3 ; Co_x 是加热系统 x 的能量转换效率,单位为%; CV_x 是供热系统 x 消耗的能源的比热值,单位为

$\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, kJ/kg 为煤, kJ/m^3 为天然气; P_x 是供热系统 x 中能源的单位成本, 单位为美元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$, 煤为美元/ kg , 天然气为美元/ m^3 ; CH_x 是采暖成本, 单位为美元; $CH_{x,d,A}$ 是 $1\text{ d } 1\text{ m}^2$ 温室面积的采暖成本, 单位为美元/ $(\text{m}^2\cdot\text{d})$; A_g 是试验温室面积, 单位为 m^2 ; D 是总加热时间, 单位为 d 。

2 结果与讨论

2.1 试验条件

本试验的时间为 2017 年 12 月 1—7 日。通过采集的数据来说明主动蓄热系统的行为。1 d 周期定义为第 1 天 08:00 至第 2 天 08:00。图 2 显示了室外空气温度的变化, 北墙表面的太阳辐射和温室气体温度的变化。这 7 d 包括 4 个晴天和 3 个阴天, 在试验期间, 北墙表面的每日太阳辐射峰值从 $400\text{ W}/\text{m}^2$ 到 $643\text{ W}/\text{m}^2$ 不等。温室的透明覆盖物能够最大限度地提高太阳直接辐射的透射率。然而, 由于存在不透明的北墙和屋顶, 同时, 冬季的太阳高度角最低, 导致透明覆盖物的热量较低。这一趋势表明, 温室内部气温主要取决于实时的太阳辐射度。

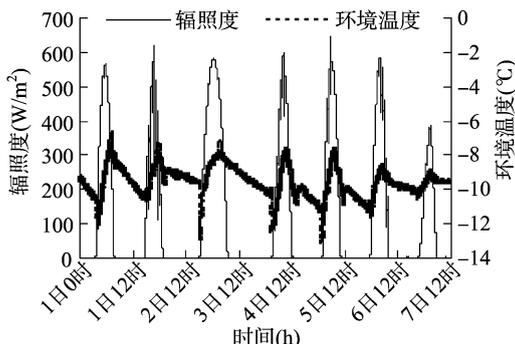


图2 太阳辐射强度(在垂直北壁)及室外空气温度

在 08:00, 2 个温室内的外部保温毯被收回, 16:00 进行屋顶覆盖。主动蓄热系统在 00:00 开启供暖。图 3 显示了试验和参考温室中的气温和 7 d 夜间的室外气温。主动蓄热系统所产生的温室平均气温在 $10.9\sim 14.8\text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 平均值为 $12.09\text{ }^\circ\text{C}$ 。参考温室中的气温在 $3.4\sim 10\text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 平均值为 $6.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。在 00:00—08:00 的放热期间, 室外气温范围为 $-14\sim -5\text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 平均值为 $-9.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。平均而言, 主动蓄热系统将夜间平均气温提高了 $5.6\text{ }^\circ\text{C}$ 。尽管参考温室没有配备主动蓄热系统, 但由于外壳的绝热以及北壁和土壤释放的热量, 室内平均温度仍比室外温度高约 $16.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 主动太阳能蓄热释放系统的技术性能

图 4 显示了 7 d 内蓄热墙体中达到的温度情况。墙体温度是系统运行情况的重要指标; 因此, 我们可以从墙体温度解释主动蓄热系统的性能。主动蓄热系统在 16:00 自动关闭。可以观察到, 每天的峰值温度发生在 20:00 左右, 之后蓄热墙温度开始下降。这种趋势表明能量增益被温室温度的降低所抵消, 并且蓄热墙的能量含量开始下降。20:00 以后, 主动蓄热系统开启并开始释放能量, 导致蓄热墙体温度在 7 d 内从 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $21\text{ }^\circ\text{C}$ 。

主动蓄热系统的性能还可以通过热搜集效率、利用效率和性能系数来评估。7 d 的结果列于表 2。热收集效率 E_c/E_s 在 7 d 内为 51% 至 75%。这个范围主要取决于 2 个温室中的

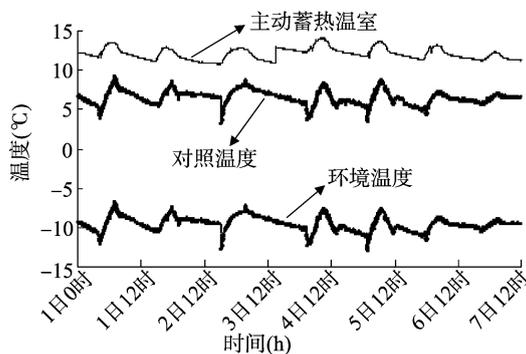


图3 试验温室及参考温室气温和环境温度变化特性

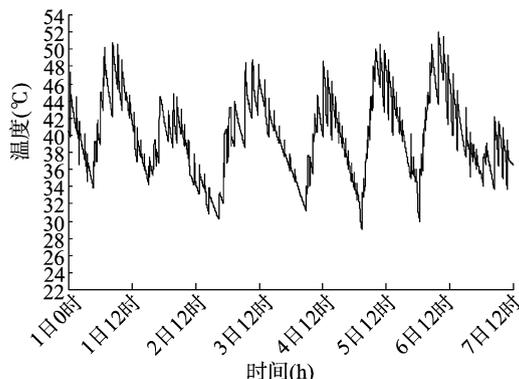


图4 2017年12月1—7日的蓄热墙体温度

室外风速和通风水平, 因为每天手动调整盖子的开口并且室内空气流量影响到温室搜集到的太阳能。在整个测量期间, 主动蓄热系统的平均集热效率水平达到了 62%, 这是因为主动蓄热系统结构得到了改善, 并且内部循环空气变得更加均匀。

表2 累积收集的太阳辐射 E_s 、释放的能量 E_c 和风机消耗的电能 E_r

测试日期 (月-日)	E_s (kW)	E_c (kW)	E_r (kW)	E_{con} (kW)	热搜集 效率	利用 效率	性能 系数
12-01	338	202	143	41	0.60	0.71	3.5
12-02	429	273	170	41	0.64	0.62	4.2
12-03	378	229	170	41	0.61	0.74	4.2
12-04	221	144	113	41	0.65	0.78	2.8
12-05	465	349	177	41	0.75	0.51	4.4
12-06	174	115	89	41	0.51	1.29	2.8
12-07	229	160	114	41	0.70	0.71	2.8

从温室失去的能量与主动蓄热系统释放的能量来看, 墙壁未覆盖的区域以及地面土壤热平衡。为了估计它们的相对贡献, 通过应用根据本研究中的绝缘毯 (2 cm 聚乙烯泡沫) 的热阻计算的恒定 k_b 值 [$1.85\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$] 来计算从温室向环境损失的能量和南向屋顶内外表面的对流传热系数。由此产生的热流在图 5 中示出了 2 个特征夜。很显然, 由于蓄热墙温度降低, 主动蓄热系统释放的热量在夜间减少, 并且热量损失在一个恒定水平附近波动。未覆盖的墙壁和地面土壤释放的热量是 2 条线的差异, 它主要取决于风机的能量消耗, 这与设备的流动阻力以及风道布置有关。对主动蓄热系统进行了改进, 减小压力损失。但在实际应用中, 风道仍然必须设计得更仔细, 以尽量减少风机耗能。

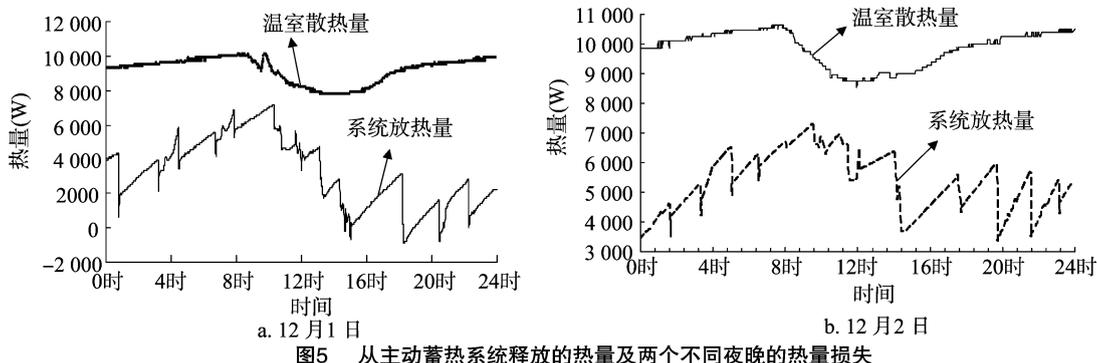


图5 从主动蓄热系统释放的热量及两个不同夜晚的热量损失

2.3 主动蓄热释放系统的经济性能

自2017年12月1—7日,主动蓄热系统提供的能量为2 048 MJ。试验期间,主动蓄热系统共消耗了163 kW·h(587 MJ)的电能。在本次研究中,试验期间的电价高峰期和谷电价格分别为1.4元/(kW·h)和0.45元/(kW·h),而电力成本为1.02元/(kW·h),因为主动蓄热系统工作时间约为8 h。主动蓄热温室地面采暖成本为0.041 3元/(m²·d)。表3还说明了在测试期间的主动蓄热系统、电力供暖、煤炭供暖和天然气供暖系统的经济性能比较结果。电供暖需要相当于596 kW·h的电力,煤炭供暖将消耗348 kg标准煤,而天然气供暖将消耗203 m³天然气(1个大气压时为249 kg),以提供与主动蓄热系统释放到温室相同的热量。以主动蓄热系统的采暖成本为100%,电力供暖、煤炭供暖和天然气供暖系

统的相对采暖成本分别为368.7%、71.8%、153.6%。电力供暖和天然气供暖系统供暖成本比主动蓄热系统分别高267.8%和53.6%,但煤炭供暖成本比主动蓄热系统低28.2%。

在本研究中,主动蓄热系统的初始总投资约为64.33元/m²。预计温室番茄产量增加15%,回收期约为5年。此外,测试期间,种植者支付约0.041 3元/(m²·d)的运行费用,对主动供暖系统进行维护等相关工作,折旧费用可计算为约0.017 6元/(m²·d),设计寿命为10年。电力供暖、煤炭供暖和天然气供暖系统的初始投资分别为72.226、59.808、60.935元/m²。考虑到人工成本、维护成本和折旧费用等因素,假定电力供暖、煤炭供暖和天然气供暖系统的指定寿命为15年,主动蓄热系统、电力供暖、煤炭供暖和天然气供暖系统的成本分别为0.140、0.245、0.126、0.154元/(m²·d)。

表3 试验期间使用不同能源的温室采暖成本比较

热经济参数	总能耗	热量(kJ)	能源转换效率(%)	能源价格	运行成本[元/(m ² ·d)]	相对供暖成本(%)
主动蓄热	163 kW·h	3 600	351	1.02元/(kW·h)	0.041 3	100.0
电供暖	596 kW·h	3 600	95	1.02元/(kW·h)	0.151 9	368.7
煤炭供暖	348 kW·h	29 306	60	1.02元/kg	0.029 4	71.8
天然气供暖	203 m ³	37 590	80	3.72元/m ³	0.063 0	153.6

主动蓄热系统的供热成本随能源价格波动而变化,能源价格主要由供需决定,同时还有法规和运输成本。尽管主动蓄热系统的采暖成本高于煤炭供暖,但主动蓄热系统的可再生节能特性和低二氧化碳排放的优势,使得主动蓄热系统成为北方地区温室供暖的更好选择,此外,主动蓄热系统与其他传统供暖系统的经济比较需要根据与实际温室供暖有关的投资成本、运营成本、维护成本和人工成本进行更全面的调查和分析,而不是参考住宅建筑。

3 结论

主动蓄热系统用于在白天储存太阳能,并在冬季夜间加热温室。试验结果表明,主动蓄热系统使温室夜间气温平均升高5.6℃。主动蓄热系统所产生的温室平均气温在10.9~14.8℃之间,平均值为12.09℃。

电供暖和天然气供暖系统供暖成本分别比主动蓄热系统高267.8%和53.6%,而煤炭供暖成本比主动蓄热系统低28.2%。

主动蓄热系统能够较好地替代化石能源供暖的温室,以实现北方大量温室的整体能耗,实现绿色生态农业的发展目标。

参考文献:

- [1] Wang S, Jin L, Han Z, et al. Discharging performance of a forced-circulation ice thermal storage system for a permanent refuge chamber in an underground mine [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 110:703-709.
- [2] Ono A, Kamide H, Kobayashi J, et al. An experimental study on natural circulation decay heat removal system for a loop type fast reactor [J]. Journal of Nuclear Science & Technology, 2016(9):1-12.
- [3] Srivastava A K, Kudariyawar J Y, Borgohain A, et al. Experimental and theoretical studies on the natural circulation behavior of molten salt loop [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98:513-521.
- [4] Lee H, Ozaki A, Lee M. Energy saving effect of air circulation heat storage system using natural energy [J]. Building & Environment, 2017, 124:12-23.
- [5] Liu Z, Li Y, Lei G, et al. Experimental study on refrigeration performance and fluid thermal stratification of thermodynamic vent [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 2(12):23-29.
- [6] Assari M R, Tabrizi H B, Movahedi M J. Experimental study on destruction of thermal stratification tank in solar collector performance

蒋丽丽,姜大庆. 基于BP神经网络的农资库存数据插补技术[J]. 江苏农业科学,2018,46(20):268-271.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.20.068

基于BP神经网络的农资库存数据插补技术

蒋丽丽,姜大庆

(南通科技职业学院,江苏南通 226007)

摘要:当前一般按照数据的后验分布,为缺失值插入估计值,通常低估了统计量的方差,导致统计量估计置信范围降低,检测显著性降低。为此,提出1种新的基于BP神经网络的农资库存数据插补技术。为了增强不同年份农资库存数据的可比性,对数据进行归一化处理。针对训练的BP神经网络,通过平均绝对误差、均方误差、平均预测误差、平均绝对百分误差完成统计分析,评价模拟值和观测模拟值间的离散程度。分析了BP神经网络结构,对农资库存数据进行插补的过程中,构造双向时间识别序列,改变应用前一时间段农资库存数据预测后期数据的传统方式,采用缺失时间段前后已有农资库存数据共同对缺失数据进行预测。完成农资库存数据的处理后,需对已有样本进行训练,如果检验拟合度指标值高于0.8,则认为训练结果可靠,从而完成对缺失值的预测,实现农资库存数据插补。试验结果表明,所提技术插补精度高。

关键词:BP神经网络;农资库存;数据插补

中图分类号:S126 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)20-0268-04

农业在我国国民经济与社会发展中起着基础作用,而农业的发展离不开农产品^[1]。对农资企业来说,农资库存统计非常关键,但农资库存数据也会无法避免地出现缺失值。缺失值可能是因为工作人员理货时出现遗漏,或因疏忽导致的明显错误记录,甚至为变量取值之一,也就是当前农资库存数据集中某个或某些属性值缺失^[2-3]。需要通过科学的技术对农资库缺失数据进行插补处理。

通常情况下,可通过成对删除的方式减少数据缺失,通过加权调整法调整成列删除在数据未完全缺失下的有偏估

计^[4]。当前一般采用更优的插补取代删除,也就是按照数据的后验分布,为缺失值插入科学合理的估计值。为了增强插补值的性能,可为插补值添加随机干扰性,即单一插补^[5-6]。然而单一插补通常低估了统计量的方差,导致统计量估计置信范围降低,检测显著性降低^[7]。为了解决该问题,提出1种新的基于BP神经网络的农资库存数据插补技术,为提高农资库存数据的完整性提供技术支持。

1 数据处理及模型评价

1.1 数据预处理

为了增强不同年份农资库存数据的可比性,需对数据进行归一化处理^[7-8],针对季节性农资库存这种随机改变的数据,通过归一化方法将数值标准化成最大值是1。归一化处理公式如下:

$$y = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

式中: y 用于描述输入变量的归一化值; x 用于描述输入变量; x_{\min} 用于描述输入变量最小值; x_{\max} 用于描述输入变量最高值。

收稿日期:2018-07-10

基金项目:江苏省南通市科技项目(编号:CP22012006);江苏省南通市226高层次人才资助项目。

作者简介:蒋丽丽(1982—),女,江苏南通人,硕士,讲师,主要从事农业信息技术、教育技术研究、教育与应用开发。E-mail:664733@qq.com。

通信作者:姜大庆,硕士,教授,主要从事农业信息技术等方面研究。E-mail:1738460845@qq.com。

[J]. Journal of Energy Storage,2018,15(Feb. 2018):124-132.

[7] Hou F, Chang H, Zhao Y, et al. Experimental study of critical heat flux enhancement with hypervapotron structure under natural circulation conditions[J]. Nuclear Engineering & Design,2017,316:209-217.

[8] Marcel C P, Rohde M, van der Hagen T H J J. An experimental parametric study on natural circulation BWRs stability[J]. Nuclear Engineering & Design,2017,318:135-146.

[9] Tian W, Cao X, Yan C, et al. Experimental study of single-phase natural circulation heat transfer in a narrow, vertical, rectangular channel under rolling motion conditions[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2017,107:592-606.

[10] Murali G, Mayilsamy K. Spiral phase-change material for enhancing natural circulation solar water heater: An experimental

study[J]. Experimental Heat Transfer,2016,30(2):151-161.

[11] Misale M. Experimental study on the influence of power steps on the thermohydraulic behavior of a natural circulation loop[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2016,99:782-791.

[12] Kapsalis V, Karamanis D. Solar thermal energy storage and heat pumps with phase change materials[J]. Applied Thermal Engineering,2016,99:1212-1224.

[13] Nam-Choon B, Sung-Bum K, U-Cheul S. An Empirical Study on the Thermal Performance and Dynamic Behavior of Wall Integrated Thermosiphon Solar Water Heater[J]. Journal of the Korean Solar Energy Society,2016,36(6):25-35.

[14] Lv Q, Lin H C, Shi S, et al. Experimental Study of DRACS Thermal Performance in a Low-Temperature Test Facility[J]. Nuclear Technology,2016,196(2):89-100.