

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.06.026

基于灰箱理论的配电房温度变化预测模型研究

郝方舟¹, 赵慧², 赵洪山², 赵阳², 文海艳²

(1. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510600;

2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 配电房环境封闭、透风性差、温度较高,为解决因温度高而影响电力设备安全运行的问题,需要研究配电房温度变化的预测模型,以便进行温度调控。提出基于灰箱理论研究的配电房温度变化的预测模型,为实现配电房温度的自动化控制提供了模型基础。首先介绍了配电房的基本结构,然后根据传热学、动力学等物理知识及热电相似理论得到配电房的热电模型;接下来基于灰箱法利用相关数据的时间序列估计该模型中未知的物理参数,并通过其自相关矩阵验证模型的合理性;最后,将模型的一步和六步预测温度值和实际温度值进行对比分析,结果表明该模型能够较好地描述配电房的热动力学特性,与配电房的实际温度变化相一致。

关键词: 配电房;灰箱理论;热电模型;预测;自相关矩阵

中图分类号: TM763

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)06-0187-06

0 引言

配电房是关键供电节点,起着合理分配电能的作用。夏季温度较高,且配电房环境封闭,因数量众多位置分散而不能及时对环境进行人为调控,易发生温度偏高的现象,而电力设备所处环境对健康指数的影响极大^[1],高温易使设备发生故障,导致配电房的运维水平大大降低。为实现温度的可观、可测、可控,首先需对配电房的温度变化进行建模研究,然后进行温度控制,降低能耗,推进智能绿色配电房建设。

目前,关于温度的研究主要有3种建模方法:机理(白箱)建模、辨识(黑箱)建模及灰箱建模。机理建模是基于传热学进行分析,通过能量平衡建立温度模型^[2-5],采用机理模型属于白箱理论的一种,可以清楚模拟温度变化的本质,但测量未知参数需要浪费大量的人力、财力。文献[6]使用数值模拟法来预测温度分布,输入一定的边界条件较准确地模拟温度,但工作量繁琐。辨识建模只需根据系统的输入输出描述系统行为的数学模型,文献[7]利用系统辨识技术建立了自回归滑动平均模型。文献[8]利用通信机房的相关数据得到了时间序列模型,但这种方法的预测值仅与近期有关,可能导致与客观情况不符,尤其在中长期预测的情况下。也有采用神经网络建立建筑物温度的非线性参数模型^[9-13],虽可较好地模拟温度变化特性,但存在训练时间长、数据量大等缺陷^[14-15]。灰箱技术逐渐成

为温度建模的热门方法,文献[16—17]对居民建筑物温度采用灰箱技术建立了预测模型,也有研究在灰箱模型基础上对温度进行控制^[18-21],但并未考虑大气温度的影响,导致模型精度较低。

目前,对配电房温度灰箱建模的研究很少。文中基于灰箱理论建立配电房温度预测模型,此方法结合了机理和辨识建模的优势。简要分析了配电房的配置结构,利用传热学知识得到配电房的等效电阻-电容(resistor-capacitance, R-C)网络,建立了考虑大气温度的热电模型,使用实验数据进行训练,估计出模型中的未知参数,为配电房温度的优化控制问题建立了模型基础。

1 配电房基本结构

配电房是配电系统中的重要环节,担负着为用户分配电力的任务,配电房内布置着变压器、配电柜等重要的一二次设备^[22]。以户内双电源带2台干式变压器的配电房为例说明配电房的主要结构及配置。

采用《国家电网公司输变电工程典型设计10 kV 配电工程分册》PB-6方案中的10-PB-6-10-1模块、PB-4方案中的10-PB-4-ZB-1模块以及PB-3方案中的10-PB-3-0.4-1模块,为户内双电源,带2台630 kV·A干式变压器和空调的配电房,高压侧为10 kV,采用10面屏的充气式负荷开关柜(下进下出线),2个独立的单母线接线,出线8回,户内单列布置;低压侧为0.4 kV,采用9面屏的固定式低压开关柜(上进下出线),单母线分段接线,出线24回,户内单列布置;变压器采用树脂绝缘干式无载调压变

收稿日期:2019-05-22;修回日期:2019-07-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807063)

压器。还有 2 面屏的 0.4 kV 电容补偿柜、照明配电箱和电缆等设备,无功补偿按变压器容量 30% 配置。配电房的简化平面布置如图 1 所示, D1—D11 为低压侧开关柜, G1—G10 为高压侧开关柜。

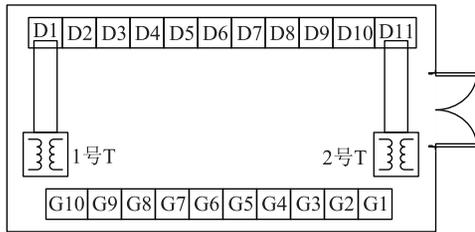


图 1 配电房平面布置

Fig.1 Power distribution room floor plan

配电房布置在地上一层,设备间下铺设电缆夹层,占地面积约 90 m²,带干式变压器的配电房只有一个房间,高压室、低压室和变压器室合为一体。

2 配电房的温度预测模型

由于配电房中热流动的复杂性,针对配电房的配置结构,利用灰箱理论技术对配电房温度预测模型进行研究,包括模型结构确定和参数估计 2 个步骤。根据对配电房的热流动的分析,建立了基于热理论的预测模型,然后对模型中的未知参数进行估计^[23-24]。

2.1 传热学定律

配电房的热电模型通常是由根据传热机理建立的子模型组成的。传热是由于温差引起的热量传递,又称热传递。凡是有温差存在时,热量便从较高温度区域向较低温度区域传递,产生传热现象。传热过程可分为 3 种基本传热模式^[25],即:

(1) 热传导(导热)。物系中质点不发生相对位移,仅借分子、原子和电子等微粒的运动进行热量传递的过程。例如固体的传热。

(2) 热对流(对流)。物系中质点发生相对位移进行热量传递的过程,常发生在流体运动进程中,例如液体和气体的传热。

(3) 热辐射(辐射)。由于温度不同,以场形式进行热量传递的过程,例如太阳辐射,空调或加热器引起的热辐射。

由傅立叶定律和热传递机理可知,假设传热材料表面均匀和导热系数不随温度的变化而变化,则 2 种传热介质之间通过传导或对流形式传递的热量与两介质之间的温差成正比^[26]。因此,传导或对流的热量传递可以使用热电阻来模拟:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{R}(T_1 - T_2) \quad (1)$$

式中: Q 为热量; T_1, T_2 分别为 2 个传热介质的温度; R 为转移热能的阻力。

热动力学的另一个重要概念是描述材料蓄热能力的热容量^[27]。介质内部的温度变化通过微分方程给出:

$$\frac{dQ}{dt} = C \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

热容量取决于温度的变化,配电房可操作的温度间隔很小,因此热容量可以假定为常数。

2.2 基于热理论的预测模型

基于第 1 节中配电房的结构与配置,配电房可以看作一个仅有外墙结构和调温设备——空调的热动力学房间,房间的内部温度,外墙温度和地板温度均被假设为是均匀分布的。从而可以将配电房的热动力学模型表述为具有 2 种温度状态(内部温度、外墙温度)的集总模型^[28-29]。

由于式(1)、式(2)与电阻、电容特性之间有明显的相似性,配电房的热量传递通常被建模为一个由电阻器和电容器组成的电网络^[30],其中温度相当于电压,热流量相当于电荷的流动,即电流。等效的 R-C 电网络如图 2 所示。 C_i, C_w 分别为室内空气和外围墙壁的热容量; R_o, R_{ow}, R_{iw} 分别为配电房内部直接到大气、外墙到大气、内部空气到外墙的传热阻力; T_i, T_o, T_w 分别为配电房内部空气温度、外部大气温度、外围墙壁温度; S_h 为空调的开关状态。

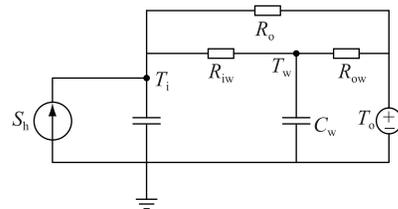


图 2 等效 R-C 网络

Fig. 2 Equivalent R-C network

由图 2 可以得到 2 个描述温度状态的耦合微分方程,并用矩阵表示法将其写成:

$$\dot{T} = M(\theta)T + H(\theta)U \quad (3)$$

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_i} \left(\frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_{iw}} \right) & \frac{1}{R_{iw} C_i} \\ \frac{1}{R_{iw} C_w} & -\frac{1}{C_w} \left(\frac{1}{R_{ow}} + \frac{1}{R_{iw}} \right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$H(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} & \frac{1}{R_o C_i} \\ 0 & \frac{1}{R_{ow} C_w} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{T}=[T_i, T_w]'$,为包含2种温度状态的状态向量; $\mathbf{U}=[S_h, T_o]'$,为输入向量,表示系统的外源输入;向量 $\boldsymbol{\theta}=[R_o, R_{iw}, C_i, C_w, R_{ow}]$,包含式(3)中所有的未知物理参数。

式(3)为连续时间内的确定性线性状态空间模型。在已知的时刻 t ,对式(3)在预测范围 N 内进行积分,可以得到:

$$\mathbf{T}(t+N)=\mathbf{T}(t)e^{MN}+\int_t^{t+N}e^{M(t+N-s)}\mathbf{H}\mathbf{U}(s)ds \quad (6)$$

假设在给定的预测范围 N 内,系统的外源输入是不变的,即空调状态和大气温度是不变的,则式(6)可以简化为:

$$\mathbf{T}(t+1)=\mathbf{A}\mathbf{T}(t)+\mathbf{B}\mathbf{U}(t) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{A}=e^M$; $\mathbf{B}=\int_0^N e^{Mr}\mathbf{H}dr$ 。

式(7)为离散时间内的线性状态空间模型,矩阵 \mathbf{A} 定义了当前时刻状态对下一时刻状态的影响,矩阵 \mathbf{B} 定义了外源输入对系统状态的影响。式(5)描述的是一个确定性系统,如果输入向量和初始状态向量已知,则可以预测未来一段时间区域的状态。

状态变量 \mathbf{T} 中的2个温度状态,只有一个是可观测的,因此观测方程可写成:

$$y(t)=\mathbf{C}\mathbf{T}(t)+\mathbf{D}\mathbf{U}(t)+e(t) \quad (8)$$

式中: $e(t)$ 是观测误差,假设 $e(t)$ 是具有零均值和方差的正态分布的白噪声。矩阵 \mathbf{C} 和 \mathbf{D} 分别定义了状态变量和输入变量对测量状态的影响。输入变量对配电房中的可测空气温度没有直接影响,因此 $\mathbf{D}=0$ 。矩阵 \mathbf{C} 用于选择被测量的状态。对于配电房温度而言,仅测量配电房内部的空气温度,即 $\mathbf{C}=[1 \ 0]$ 。

灰箱建模通常是一个迭代过程,包括模型结构,参数估计和模型验证3个步骤。接下来,需要对式(3)中的未知参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 和式(8)中的方差 R_e 进行估计,得到关于配电房温度的预测模型。

2.3 温度预测模型参数估计

本节采用极大似然法(maximum likelihood method, ML)来估计配电房温度预测模型中的未知参数^[31]:式(3)中的物理参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 和式(8)中的方差 R_e 。此时对向量 $\boldsymbol{\theta}$ 进行更新(下文中提到的 $\boldsymbol{\theta}$ 均指的是式(9)):

$$\boldsymbol{\theta}=[R_o, R_{iw}, C_i, C_w, R_{ow}, R_e] \quad (9)$$

在给定模型结构的情况下,找到使关于观测向量 $y_0, y_1, \dots, y_k, \dots, y_n$ 输出值序列的似然函数取最大值时对应的 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$,此值即为未知参数 $\boldsymbol{\theta}$ 的极大似然估计值。为了方便描述观测向量序列,引入向量 $\mathbf{Y}(n)$:

$$\mathbf{Y}(n)=[y_0, y_1, \dots, y_n] \quad (10)$$

在统计学中,似然函数可表示:

$$L(\boldsymbol{\theta}; \mathbf{Y}(n))=(\prod_{k=1}^n P(y_k | \mathbf{Y}_{k-1}, \boldsymbol{\theta}))P(y_0 | \boldsymbol{\theta}) \quad (11)$$

假设条件概率密度符合高斯分布,根据条件概率定理可将似然函数改写,然后取对数,得到:

$$\begin{aligned} \ln(L(\boldsymbol{\theta}; \mathbf{Y}(n))) = & -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\ln(\det(R_{k|k-1})) + \boldsymbol{\varepsilon}_k^T R_{k|k-1}^{-1} \boldsymbol{\varepsilon}_k) - \\ & \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^n k \right) \ln(2\pi) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\hat{y}_{k|k-1}=E(y_k | \mathbf{Y}_{k-1}, \boldsymbol{\theta})$; $R_{k|k-1}=V(y_k | \mathbf{Y}_{k-1}, \boldsymbol{\theta})$;

$\boldsymbol{\varepsilon}_k = y_k - \hat{y}_{k|k-1}$; $\det(\cdot)$ 为对方阵求取行列式的函数。

对于线性时不变(linear time invariant, LTI)模型,上述3个变量可以用卡尔曼滤波器来计算。

最后,配电房温度预测模型中的未知参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 的ML估计值可以通过求解非线性优化问题来确定:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}=\operatorname{argmax}_{\boldsymbol{\theta}}\{\ln(L(\boldsymbol{\theta}; \mathbf{Y}(n)))\} \quad (13)$$

式中: $\operatorname{argmax}_{\boldsymbol{\theta}}$ 为似然函数取最大值时所对应的向量 $\boldsymbol{\theta}$ 的值。

3 算例验证

在本节中,首先根据配电房某3d的实验历史数据,使用ML对模型中的未知参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 进行估计,进而得到配电房温度预测模型,最后,通过模型输出值与实际温度值进行对比,验证模型的准确性与有效性。

基于配电房实验中收集的3个时间序列,使用ML成功估计了模型参数。参数估计结果见表1。

表1 参数估计值及标准差
Table 1 Parameter estimate values and standard deviation

参数	ML估计值	估计标准差
$\hat{R}_o / (\text{℃} \cdot \text{kW}^{-1})$	5.06	0.41
$\hat{R}_{iw} / (\text{℃} \cdot \text{kW}^{-1})$	0.41	0.12
$\hat{C}_i / [(\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{℃}^{-1}]$	49.62	0.24
$\hat{C}_w / [(\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{℃}^{-1}]$	323.73	0.02
$\hat{R}_{ow} / (\text{℃} \cdot \text{kW}^{-1})$	4.81	1.41
$\ln(\hat{R}_e) / \text{℃}^2$	-13.27	0.07

表1中的估计值表明了相比配电房内部空气的热容量而言,外围墙壁的热容量是较大的,这是因为配电房的外围墙壁需要由储热能力较强的材料构成,来维持室内温度。还表明了从配电房内部空气到外围墙壁的热对流阻力很小,而从外围墙壁到

大气的热对流阻力相对较大,说明外壁的热容量大部分集中在配电房围护结构的外层,即配电房的外层。

同时,还得到了各个参数的自相关矩阵如表 2 所示,若此矩阵中的非对角线值没有接近于 1 的值,说明模型的参数数量是合理的,没有过参数化,即模型结构合理。

表 2 各个参数的自相关矩阵

名称	T_{i0}	T_{w0}	R_o	R_{iw}	C_i	C_w	R_{ow}	R_e
T_{i0}	1							
T_{w0}	0.13	1						
R_o	0.02	0.17	1					
R_{iw}	0.02	0.03	0.03	1				
C_i	0.01	0.07	0.05	0.18	1			
C_w	0.01	0.10	0.19	0.26	0.17	1		
R_{ow}	0.01	0.02	0.01	0.16	0.02	0.25	1	
R_e	0.01	0.08	0.29	0.14	0.05	0.28	0.01	1

为了验证模型的准确性,将配电房的温度预测模型用于预测接下来 1 d 的配电房内部温度,分别进行一步和六步预测,即预测 5 min 和 30 min 内的温度。配电房内的温度预测结果及预测残差分别如图 3 和图 4 所示。

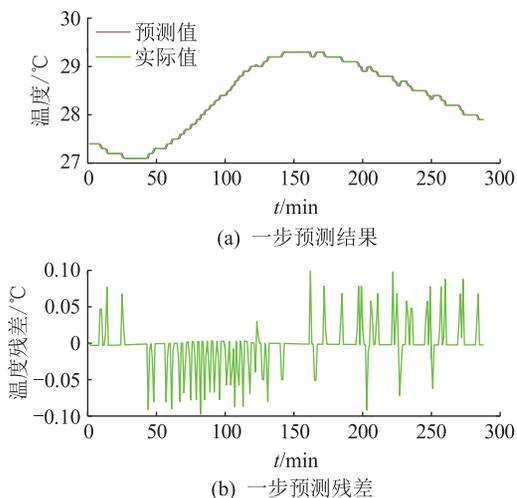


图 3 一步温度预测结果及残差

Fig.3 One-step temperature predictions and residuals

图 3 表明,一步预测温度与实际测量温度曲线几乎重合,且对应的残差表明了预测温度偏差不超过 0.1 °C。因此配电房内温度可以在 5 min 内非常精确地预测。从图 4 中的六步温度预测图可以看出,预测温度仍与实际测量温度相吻合,变化趋势相同。从残差图可以看出,预测温度与实际温度的偏差不超过 0.5 °C,所以该模型也能较好地反应出配电房未来 30 min 内的温度变化。

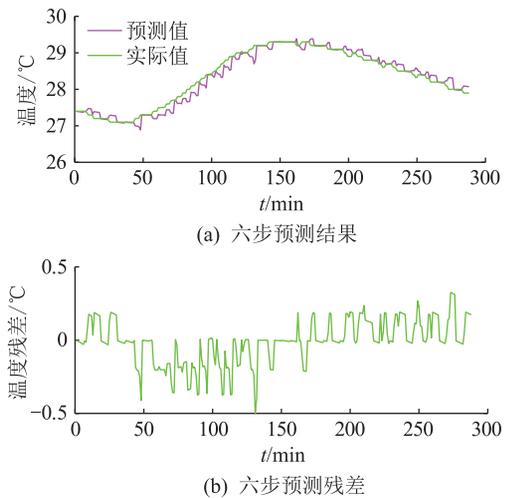


图 4 六步温度预测结果及残差

Fig.4 Six-step temperature predictions and residuals

综上所述,文中建立的基于灰箱理论与热电相似理论的配电房温度预测模型是合理的,能准确地实现对配电房未来某时段的温度预测。

4 结语

针对配电房的结构,利用传热学、热电相似理论等物理知识,建立 R-C 网络来等效模拟配电房的热量传递,将空调开关状态作为调控输入、实时大气温度作为干扰输入,建立配电房温度的灰箱模型,以预测未来某时段的配电房温度。模型输出结果表明该模型在预测配电房温度方面表现出良好的效果,为内部电力设备的安全运行奠定了研究基础。

根据已建立的配电房温度预测模型来进行配电房温度的优化控制,控制调温设备能够及时动作,使温度足以保证内部电力设备的安全运行,同时还应使空调的功耗尽可能小,达到节能的效果,都有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 林文健,刘振林,余进江. 浅谈配电房环境感应和控制原理[J]. 中国新技术新产品,2018,367(9):29-3.
- LIN Wenjian, LIU Zhenlin, YU Jinjiang. Discussion on the environment induction and control principle of power distribution room[J]. China New Technology and New Products, 2018, 367(9):29-3.
- [2] DE Z H F. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model[D]. Wageningen: Land Bouw University, 1996.
- [3] LUO W H, DAI J F. Simulation of greenhouse management in the subtropics, part I: model validation and scenario study for the winter season [J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(3): 307-318.

- [4] LUO W H, STANGHELLINI C, DAI J F, et al. Simulation of greenhouse management in the subtropics, part II: scenario study for the summer season[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(4):433-441.
- [5] 李念平, 何东岳, 李靖, 等. 中庭式住宅建筑热压通风的预测模型研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(6):6-10.
LI Nianping, HE Dongyue, LI Jing, et al. Study on prediction model of hot-press ventilation in atrium residential buildings[J]. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 2010, 37(6):6-10.
- [6] 李俊红, 罗行, 黄晨, 等. Block 模型与数值模拟法预测室内温度分布[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(S2):124-126.
LI Junhong, LUO Xing, HUANG Chen, et al. Block model and numerical simulation for predicting indoor temperature distribution[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(S2):124-126.
- [7] 左志宇, 毛罕平, 张晓东, 等. 基于时序分析法的温室温度预测模型[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(11):173-177, 182.
ZUO Zhiyu, MAO Hanping, ZHANG Xiaodong, et al. Greenhouse temperature prediction model based on time series analysis method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2010, 41(11):173-177, 182.
- [8] 彭刚, 周晨阳. 基于 CFD 的通信机房温度模型预测控制[J]. *计算机仿真*, 2019, 36(2):287-291.
PENG Gang, ZHOU Chenyang. CFD-based predictive control of communication room temperature model[J]. *Computer Simulation*, 2019, 36(2):287-291.
- [9] SEGNER I, BOULARD T, BAILEY B J. Neural network models of the greenhouse climate[J]. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 1994, 59(3):203-216.
- [10] 牛建军, 吴伟, 陈国定. 基于神经网络自整定 PID 控制策略及其仿真[J]. *系统仿真学报*, 2005, 17(6):1425-1427.
NIU Jianjun, WU Wei, CHEN Guoding. Self-tuning PID control strategy based on neural network and its simulation[J]. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(6):1425-1427.
- [11] 张亚楠. 基于模型预测的教室环境品质智能控制方法的研究[J]. *工业控制计算机*, 2017, 30(9):72-74.
ZHANG Yanan. Research on intelligent control method of classroom environmental quality based on model prediction[J]. *Industrial Control Computer*, 2017, 30(9):72-74.
- [12] 李德智, 张文科, 嵇建飞. 基于果蝇优化模糊神经网络模型的售电市场评估[J]. *电力需求侧管理*, 2019, 21(1):27-31.
LI Dezhi, ZHANG Wenwen, JI Jianfei. Electricity retail market evaluation based on fruit fly optimized fuzzy neural network model[J]. *Power Demand Side Management*, 2019, 21(1):27-31.
- [13] 余海鹏, 康剑南, 包伟伟. 1 000 MW 高效宽负荷率超超临界机组给水温度的优化研究[J]. *浙江电力*, 2017, 36(9):67-70.
YU Haipeng, KANG Jiannan, BAO Weiwei. Optimization of feedwater temperature for a 1 000 MW ultra-supercritical unit with high efficiency and wide load[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2017, 36(9):67-70.
- [14] 张介, 马贇, 张旭鹏, 等. 基于聚类分析方法的风电场日前功率预测研究[J]. *浙江电力*, 2018, 37(1):42-46.
ZHANG Jie, MA Yun, ZHANG Xupeng, et al. Research on day-ahead power forecast of wind farm based on cluster analysis[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2018, 37(1):42-46.
- [15] 李晋, 秦琳琳, 吴刚, 等. 现代温室温度系统在线建模[J]. *信息与控制*, 2008, 37(4):500-508.
LI Jin, QIN Linlin, WU Gang, et al. On-line modeling of modern greenhouse temperature system[J]. *Information and Control*, 2008, 37(4):500-508.
- [16] ANDERSEN K K, MADSEN H, HANSEN L H. Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations[J]. *Energy and Buildings*, 2000, 31(1):13-24.
- [17] 付国庆, 刘青, 汪宙, 等. LF 精炼终点钢水温度灰箱预报模型[J]. *北京科技大学学报*, 2013, 35(7):948-954.
FU Guoqing, LIU Qing, WANG Zhou, et al. A grey box forecasting model for molten steel temperature in LF refining end point[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2013, 35(7):948-954.
- [18] MANTOVANI G, FERRARINI L. Temperature control of a commercial building with model predictive control techniques[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(4):2651-2660.
- [19] 蒋浩然, 刘小聪, 李扬. 基于多变量灰色预测模型的省级电力公司中长期电量预测[J]. *电力需求侧管理*, 2019, 21(1):37-41.
JIANG Haoran, LIU Xiaocong, LI Yang. Mid and long term electricity consumption forecasting of provincial power companies based on multi-variable gray[J]. *Power Demand Side Management*, 2019, 21(1):37-41.
- [20] 张章, 刘英英, 徐晶, 等. 基于关键因素分析的清洁能源接纳能力提升方法研究[J]. *供用电*, 2018, 35(2):69-73.
ZHANG Zhang, LIU Yingying, XU Jing, et al. Research on method of improving clean power integration capacity based on key factor analysis[J]. *Distribution & Utilization*, 2018, 35(2):69-73.
- [21] 钟全辉, 张以全, 肖少华, 等. 基于灰色预测理论的区域电量概率预测方法及其应用[J]. *浙江电力*, 2018, 37(1):19-22.
ZHONG Quanhui, ZHANG Yiquan, XIAO Shaohua, et al. Probability forecasting method of regional electricity quantity based on grey forecasting theory and its application[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2018, 37(1):19-22.
- [22] 霍晓宇. 配电房环境监控系统的设计与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
HUO Xiaoyu. Design and implementation of power distribution room environmental monitoring system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2015.
- [23] BACHER P, MADSEN H. Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43

- (7);1511-1522.
- [24] 周依希,李晓明,瞿合祚,等. 基于 AHP-灰色关联度的复杂电网节点综合脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018,46(23):86-93.
- ZHOU Yixi, LI Xiaoming, QU Hezuo, et al. Comprehensive vulnerability assessment of complex grid nodes based on AHP-grey correlation degree[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46 (23) : 86-93.
- [25] 杨世铭,陶文铨. 传热学第4版[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. The fourth edition of heat transfer [M]. Beijing;Higher Education Press,2006.
- [26] 王栋,徐青山,陈亮,等. 参与调峰控制的空调负荷建模仿真研究[J]. 电力工程技术,2018,37(6):80-86.
- WANG Dong, XU Qingshan, CHEN Liang, et al. Simulation study of air conditioning load modeling involved in peak shaving control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018,37(6):80-86.
- [27] INCROPERA F P. 传热和传质基本原理[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- INCROPERA F P. Basic principles of heat transfer and mass transfer [M]. Beijing;Chemical Industry Press,2007.
- [28] THAVLOV A, BINDNER H W. Thermal models for intelligent heating of buildings[C]//4th International Conference on Applied Energy: Energy Innovations for a Sustainable World, Suzhou, China, 2012;1-10.
- [29] 黄国栋,许丹,丁强,等. 考虑热电和大规模风电的电网调度研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(15):162-170.
- HUANG Guodong, XU Dan, DING Qiang, et al. Review of grid dispatching considering thermal power and large-scale wind power integration [J]. Power System Protection and Control, 2018,46(15):162-170.
- [30] 杨羊. 基于热电模型的冰箱内胆再加热阶段温度场研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018.
- YANG Yang. Study on temperature field of refrigerator liner reheating stage based on thermoelectric model [D]. Hefei;Hefei University of Technology,2018.
- [31] 陶玉波,陈昊,秦晓辉,等. 短期风电功率预测概念和模型与方法[J]. 电力工程技术,2018,37(5):7-13.
- TAO Yubo, CHEN Wei, QIN Xiaohui, et al. The concept model and method of short-term wind power prediction[J]. Electric Engineering Technology, 2018,37(5):7-13.

作者简介:



郝方舟

郝方舟(1988),男,硕士,工程师,从事配电网生产运行和智能化技术工作(E-mail: 290129048@qq.com);

赵慧(1995),女,硕士在读,研究方向为智能配电网的运行与控制;

赵洪山(1965),男,博士,教授,研究方向为智能电网的控制理论与控制方法、电力设备故障预测与优化检修。

Temperature change prediction model of power distribution room based on grey box theory

HAO Fangzhou¹, ZHAO Hui², ZHAO Hongshan², ZHAO Yang², WEN Haiyan²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to cope with the closed environment of the power distribution room, the poor air permeability, the high temperature and solve the problem that the high temperature affects the safe operation of the power equipment, it is necessary to study the prediction model of the temperature change of the power distribution room for temperature regulation and control. The prediction model for temperature variation of power distribution rooms based on grey box theory is proposed, which provides a model basis for automatic control of power distribution room temperature. Firstly, the basic structure of the power distribution room is introduced. Then the thermoelectric model of the power distribution room is obtained according to the physics knowledge of heat transfer, dynamics and thermoelectric similarity theory. Next, using the time series of relevant data, the unknown physical parameters in the model is estimated based on the gray box method. Meanwhile, the rationality of the model is verified through their auto-correlation matrix. Finally, the one-step and six-step predicted temperature values of the model are compared with actual temperature values. The results not only show that the model can better describe the thermodynamic characteristics of power distribution room, also indicate that it is consistent with the actual temperature changes in the distribution room.

Keywords: power distribution room; grey box theory; thermoelectric model; prediction; auto-correlation matrix

(编辑 钱悦)