

基于 WSVM 的火电机组能效寻优及运行状态评价

王志杰¹, 吕当振¹, 田红², 刘帅¹

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南长沙 410031;

2. 长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要: 为了提升火电机组在全工况范围内的能效水平, 提出了基于加权支持向量机(WSVM)的火电机组能效寻优及运行状态评价方法: 首先, 利用机组运行数据, 依据稳定性判据和样本密度法筛除非稳态及异常工况下的运行数据; 其次, 采用能效择优方法确定模型训练时的样本权重, 利用 WSVM 建立火电机组能效寻优模型, 依据该模型获得火电机组各工况下主要指标及参数最优值; 最后, 在机组运行过程中, 将获得的最优值与过程值进行对比, 并通过构建的 Mandani 模糊评价模型实现对机组运行状态的实时量化评价。通过对某 660 MW 超临界火电机组的应用实例表明: 在 30%~100% 额定负荷区间, 基于 WSVM 方法获得的最优供电煤耗较聚类算法低 0.9~4.8 g/(kW·h), 能较好地反映火电机组能效最优状态, 为判断机组节能降耗空间提供依据; 基于模糊模型的状态评价, 可为火电机组运行优化调整提供指导。

关键词: 火电机组; 加权支持向量机; 能效; 模糊模型; 状态评价

中图分类号: TM621

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.02.008

[引用本文格式] 王志杰, 吕当振, 田红, 等. 基于 WSVM 的火电机组能效寻优及运行状态评价[J]. 热能动力工程, 2025, 40(2): 67-75. WANG Zhijie, LYU Dangzhen, TIAN Hong, et al. Energy efficiency optimization and operating status evaluation of thermal power units based on WSVM[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(2): 67-75.

Energy Efficiency Optimization and Operating Status Evaluation of Thermal Power Units based on WSVM

WANG Zhijie¹, LYU Dangzhen¹, TIAN Hong², LIU Shuai¹

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha, China, Post Code: 410031;

2. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, Post Code: 410114)

Abstract: In order to improve the energy efficiency level of thermal power units across all operating conditions, a method was proposed for energy efficiency optimization and operation status evaluation of thermal power units based on weighted support vector machine (WSVM). Firstly, using the unit operation data, the operation data under unsteady state and abnormal conditions were screened based on stability criteria and sample density. Secondly, adopting the energy efficiency optimization method to determine the sample weights during model training, and then using WSVM to establish an energy efficiency optimization model for thermal power units; Based on the model, the optimal values of the main monitoring indices and parameters for each operating condition of the thermal power unit were obtained. Finally, during the operation of the unit, the optimal values were compared with the process values, and the Mandani fuzzy evaluation model was constructed to achieve real-time quantitative evaluation of the unit's operating status. An application example of a 660 MW supercritical thermal power unit shows that the optimal coal

收稿日期: 2024-07-30; 修订日期: 2024-09-22

基金项目: 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A521N00H); 国家自然科学基金青年基金项目(52006016)

Fund-supported Project: Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. (5216A521N00H); Youth Fund Program of National Natural Science Foundation of China (52006016)

作者简介: 王志杰(1982-), 男, 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院正高级工程师。

consumption for power supply obtained by the proposed WSVM method is 0.9 – 4.8 g/(kW·h) lower than that of the clustering algorithm in the 30% – 100% rated load range, which can better reflect the optimal energy efficiency state of the thermal power unit, providing a basis for judging the energy-saving and consumption reducing space of the unit. The state evaluation results based on fuzzy models can provide guidance for the operation optimization and adjustment of thermal power units.

Key words: thermal power units, weighted support vector machine (WSVM), energy efficiency, fuzzy model, state evaluation

引 言

状态评价通常指依据设备或系统的可测量数据对其运行状态进行评估,该评估方式已被广泛应用于电力生产过程中^[1-3]。因火电机组热力系统复杂,设备繁多,已有学者对设备或系统进行状态评价研究。白翎^[4]将火电厂辅助设备运行状态分为健康运行状态及非健康运行状态,并进一步细分非健康运行状态,为辅助设备的运行管理提供依据和保障。宋莹等人^[5]采用多元状态估计和超椭圆分析方法对汽轮机的运行状态进行实时评判,实现对异常状况的早期预警。姜龙等人^[6]利用大数据分析法和工艺运行经验,对火电机组湿法脱硫浆液品质及喷淋层运行状况进行定量评价,为更好地判断和指导脱硫系统运行提供了依据。上述文献主要是对火电机组设备层级的运行状态进行评估,并未对火电机组的整体性能进行评估。

根据我国“双碳”战略目标,2025 电力行业碳排放需达到峰值^[7-8]。然而,随着新能源装机容量的不断增加及固有的“三性”特征,火电机组将在较长时期内承担调峰调频重任,这在一定程度上又会导致其能耗增加,火电机组节能降耗迫在眉睫^[9-10]。因此,诸多学者对火电机组经济性及能效开展研究。张宇等人^[11]基于主成分分析法和逼近理想解排序法从可靠性和经济性方面对火电机组运行状态进行综合评价。王宇等人^[12]运用超效率松弛测度模型及全局参比 Malmquist 模型对内蒙古火电机组的能效水平进行测评和分析。孙宇贞等人^[13]利用 K-medoids 聚类算法挖掘制粉系统能效指标的基准值,通过建立灰色模糊评估模型实现对制粉系统的能效评估。李明佳等人^[14]利用计量经济学模型和多元回归法构建新式耦合模型,对火电机组综合能

效进行计算。上述文献虽对火电机组能效进行了研究,但未应用于火电机组运行优化调整方面。在利用火电机组运行数据对机组进行能效评估及获取能效指标最优值(基准值)的研究中,聚类算法是一种常见方法,该方法通常将能效指标最优的聚类中心作为能效指标最优值,据此为机组优化运行提供参考^[15-17]。但如果火电机组多处于非能效最优状态,则通过聚类算法获得的能效最优值将偏离实际最优状态。

加权支持向量机(Weighted Support Vector Machine, WSVM)^[18]是对标准支持向量机的改进。在训练模型时通过对样本赋予不同的权重来调整模型参数,使得模型更加关注重要样本,从而避免因优质数据样本过少而导致建模时优质数据样本特性被掩盖。目前,随着新型电力系统建设的推进,火电机组已由“电量”支撑转变为“电力”支撑,特别是在迎峰保供期间,对机组安全稳定提出了更高要求,而常常忽视了机组的节能经济运行,导致机组多处于非能效最优状态。

本文采用 WSVM 和模糊模型对火电机组进行能效寻优及状态评价:首先,利用火电机组的运行数据,依据稳定性判据和样本密度实现对运行数据的预处理;其次,采用 WSVM 建立火电机组能效寻优模型,通过能效择优方法确定训练模型时的样本权重,进而获得各工况下主要指标及参数最优值;最后,在机组运行过程中,将获得的最优值与机组主要指标及参数的过程值进行对比,并通过构建的 Mandani 模糊模型实现对机组运行状态的实时量化评价,从而为火电机组节能优化运行提供指导。

1 基于能效寻优的火电机组状态评价系统

基于能效寻优的火电机组运行状态评价系统如图 1 所示。

该系统主要由能效建模和状态评价两部分构成。

能效建模对火电机组的运行数据进行预处理,通过能效择优确定样本权重,进而利用WSVM建立火电机组能效寻优模型,并据此获得各工况下主要指标及参数最优值。状态评价将获得的主要指标及参数最优值与过程值进行比较,并通过构建的Mandani模糊评价模型实现对机组运行状态的实时量化评价。

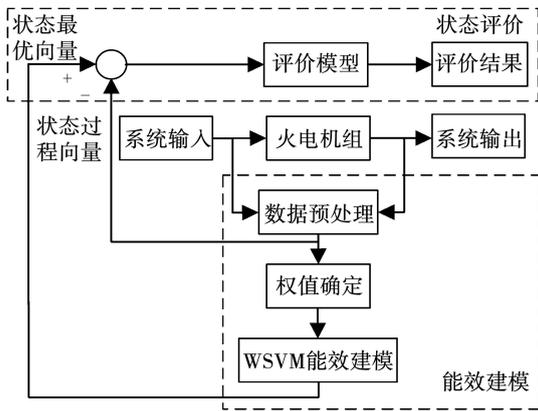


图1 基于能效寻优的火电机组运行状态评价系统

Fig. 1 Evaluation system for operating status of thermal power units based on energy efficiency optimization

2 基于WSVM的火电机组能效寻优模型

2.1 数据预处理

火电机组的运行数据包含诸多非稳态及异常工况下的运行数据,对数据进行预处理,筛除非稳态及异常工况下的运行数据是开展火电机组能效建模的基础。本文采用如下步骤实现对稳态运行数据的筛选。

步骤1:确定判断火电机组处于稳态的时间跨度 t 及特征参数。

步骤2:对火电机组的运行数据进行存储,确定时间跨度为 t 的数据集合的起点和终点。

步骤3:判断该时间段内机组是否处于稳态。

$$\frac{(x_{d,\max}^t - x_{d,\min}^t)}{(x_{d,\max} - x_{d,\min})} \times 100\% \leq \delta \quad (1)$$

式中: $x_{d,\max}^t, x_{d,\min}^t$ —第 d 个特征参数 x_d 在 t 时间段内的最大值和最小值; $x_{d,\max}, x_{d,\min}$ — x_d 在机组全工况范围内的最大值和最小值; d —确定的特征参数的个数; δ —阈值, $\delta=0.25\% \sim 0.5\%$ 。

步骤4:如果式(1)成立,则判断在 t 时段内机组处于稳态,保留该段数据;将数据集合的起点和终

点向后移动时间跨度 t ,转向步骤3;否则,转向步骤5。

步骤5:将数据集合的起点和终点向后移动一个采样时刻,构成新的数据集合,转向步骤3。

通过上述步骤获得机组处于稳态工况下的运行数据,但由于其中会包含机组处于异常或极端工况下的运行数据,故采用如下方法对异常数据进行筛选。

对于经稳态筛选获得的数据集 Ω ,对于第 i 个样本,由影响机组能效的主要指标及参数构成的输入向量 $\mathbf{x}_i \in R^m$ 及与之对应经计算获得的机组整体能效指标 y_i 构成,样本可表示为 $z_i = (\mathbf{x}_i, y_i)$ 。为了避免异常或极端工况下的数据样本对模型训练造成的影响,采取样本密度法对其进行筛选。

定义样本 z_i 的密度为:

$$D_i = \sum_{j=1}^N \frac{1}{1 + \|z_i - z_j\|^2} \quad (2)$$

式中: N —数据集 Ω 的样本总数; z_j —第 j 个样本; D_i —样本点 z_i 的密集程度, z_i 周围的样本点越密集,则 D_i 越大。

$$\Omega' = \{z_i \in \Omega \mid D_i \geq \theta\} \quad (3)$$

给定阈值 $\theta = f(\eta)$, η 为与样本总数 N 相关的百分数,通常取 $0.5\% \leq \eta \leq 1.5\%$,将 Ω' 作为训练火电机组能效寻优模型的数据集合。

2.2 基于WSVM的火电机组能效建模

火电机组整体能效(如供电煤耗)受到诸多因素的影响^[19]。为了排除外界条件对机组能效的影响,本文将煤质和环境温度作为外界影响条件,对获得的数据集合 Ω' 进行划分。假定将煤质划分为 m 个区间,环境温度划分为 n 个区间,则可将数据集合 Ω' 划分为 $m \times n$ 个数据子集 $\Omega'_k (k=1, 2, \dots, m \times n)$ 。

对于样本集 $\{\mathbf{x}_i, y_i\}; i=1, 2, \dots, l$,WSVM模型优化问题可描述为:

$$\min J(\mathbf{w}, \xi) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^l s_i (\xi_i + \xi_i^*)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} y_i - \mathbf{w}^T \varphi(x_i) - b \leq \varepsilon t_i + \xi_i \\ \mathbf{w}^T \varphi(x_i) + b - y_i \leq \varepsilon t_i + \xi_i^* \\ \xi_i \geq 0, \xi_i^* \geq 0; i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (4)$$

式中: J —目标函数; φ —非线性映射函数; \mathbf{w} —权值向量; b —偏置量; ξ_i, ξ_i^* —约束条件中下界和上界的松弛变量; ε —不敏感损失函数参数; C —惩罚系数,

$C > 0$; s_i, t_i —第 i 个数据样本对参数 C 和 ε 的权重系数,且满足 $0 \leq s_i, t_i \leq 1$ 。

对于式(4),其 Lagrange 函数可表示为:

$$L(\mathbf{w}, b, \alpha, \beta, \xi) = J(\mathbf{w}, \xi) - \sum_{i=1}^l \alpha_i [\mathbf{w}^T \varphi(\mathbf{x}_i) + b + \xi_i + \varepsilon t_i - y_i] - \sum_{i=1}^l \alpha_i^* [\mathbf{w}^T \varphi(\mathbf{x}_i) - b + \xi_i + \varepsilon t_i - y_i - \sum_{i=1}^l (\beta_i \xi_i + \beta_i^* \xi_i)] \quad (5)$$

式中: $\alpha_i, \alpha_i^*, \beta_i, \beta_i^* \geq 0 (i=1, 2, \dots, l)$, 为拉格朗日乘子,对拉格朗日乘子进行求解可获得回归函数:

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) \varphi^T(\mathbf{x}_i) \cdot \varphi(x) + b = \sum_{\mathbf{x}_i \in SV} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(\mathbf{x}_i, x) + b \quad (6)$$

式中: SV —支持向量集,即拉格朗日乘子 $\alpha_i, \alpha_i^* \neq 0$ 时所对应的向量; K —核函数; $\alpha_i, \alpha_i^* \in [0, C]$ 且满足 $\sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0$ 。

若选取核函数为径向基函数,则有:

$$K(\mathbf{x}_i, x) = \exp\{-g \|\mathbf{x}_i - x\|\} \quad (7)$$

式中: g —径向基核函数宽度。

将数据子集 Ω'_k 中的主要指标及参数构成的向量 \mathbf{x}_i 作为 WSVM 模型的输入,将机组整体能效指标 y_i 作为模型输出,建立火电机组能效寻优模型。依据该模型,获得各负荷点机组整体能效最优时的向量 $\bar{\mathbf{x}} = f(P)$, 其中 P 为机组负荷。

2.3 基于能效择优的样本权重确定

对于获得的数据子集 Ω'_k , 假设其包含 N_k 个样本,以机组整体能效指标 y 为标准,将数据子集 Ω'_k 中的样本按照优劣进行排序,并依据专家知识经验对样本进行分类。假设将数据样本划分为较好、好、一般、差和较差 5 类,每类包含的数据样本数目分别为 $N_k^c (c=1, 2, \dots, 5)$, 其示意图如图 2 所示。

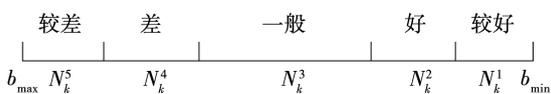


图 2 数据样本划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of data sample division

对划分为不同类的数据样本赋予不同的权重,以此突出对样本的不同重视度。对于划分的同类数

据样本,本文采用如下方式进行赋值:对于第 c 类数据样本,根据专家知识经验,假设该类数据样本的权重系数的最大值和最小值分别为 $\lambda_i^{c, \max}$ 和 $\lambda_i^{c, \min}$, 则对于其中第 j 个样本,其权重系数可表示为:

$$\lambda_i^{c,j} = \lambda_i^{c, \max} - \frac{\lambda_i^{c, \max} - \lambda_i^{c, \min}}{y_i^{c, \max} - y_i^{c, \min}} \cdot (y_i^{c,j} - y_i^{c, \min}) \quad (8)$$

式中: $\lambda_i^{c,j}$ —第 c 类数据样本中第 j 个样本的权重; $y_i^{c, \max}, y_i^{c, \min}$ —该类数据样本中能效指标的最大值和最小值; $y_i^{c,j}$ —第 j 个样本的能效指标值。

由式(8)可知,对于某数据样本,其能效指标越好,权重就越大,在利用 WSVM 建立机组能效寻优模型时,相应的惩罚系数 C 的加权系数 s_i 也就越大,反之就越小。因此,在利用 WSVM 建立能效寻优模型时,对能效指标越好的数据样本就越“重视”,反之就越“忽略”,避免出现机组在最优工况下运行数据较少导致建模不准确的问题,从而所建立的火电机组能效寻优模型能够反映机组最优的能效状态。

3 基于能效指标最优值的状态评价

在机组运行过程中,对比通过能效寻优模型获得的火电机组最优向量 $\bar{\mathbf{x}}$ (由主要指标及参数构成)与过程向量 \mathbf{x}' , 并借鉴模糊控制的思想,利用 Mamdani 模糊模型及运行人员知识经验建立状态评价模型,进而实现对各指标参数及机组运行状态的实时评价。

3.1 模糊评价模型的构建

对于获得的主要指标及参数的最优向量 $\bar{\mathbf{x}}$ 与过程向量 \mathbf{x}' 的偏差(及偏差变化率)进行模糊化处理,依据运行人员知识经验建立模糊推理规则库,形成偏差及偏差变化率的模糊评价结果,进而通过解模糊化处理实现最终量化评价。以火电机组主蒸汽压力 p 为例,说明基于 Mamdani 模糊评价模型的建立过程。

假设将某负荷点主蒸汽压力最优值与过程值的偏差 $e(p)$ 和偏差变化率 $de(p)$ 的取值范围均划分为 5 个模糊区间 NB、NS、ZR、PS 和 PB, 分别代表负大、负小、零、正小和正大。采用三角形隶属度函数对 $e(p)$ 和 $de(p)$ 进行模糊化处理^[20], 模糊模型的输出 $u(p)$ 为主蒸汽压力 p 的 5 种模糊评价结果,分别为 NB、NS、ZR、PS 和 PB, 代表当前主蒸汽压力很差、

差、一般、好和较好5种状态。根据运行人员知识经验,构建 $e(p)$ 、 $de(p)$ 与 $u(p)$ 之间的模糊规则如表1所示。

表1 主蒸汽压力 p 的模糊规则Tab. 1 Fuzzy rules for main steam pressure p

$e(p)$	$de(p)$				
	NB	NS	ZR	PS	PB
NB	NB	NS	ZR	PS	NB
NS	NS	ZR	PS	PS	ZR
ZR	NS	PS	PB	PS	NS
PS	ZR	PS	PS	ZR	NS
PB	ZR	PS	ZR	NS	NB

采用高斯隶属度函数^[21]对模糊评价结果 $u(p)$ 进行反模糊化处理,量化评价结果输出范围为0~100。

3.2 状态评价结果的形成

考虑到各指标及参数对机组能效影响不同,对各参数的评价结果进行加权求和,进而获得机组运行状态的综合评价结果。本文将熵权法^[22]和主观赋值法相结合,即能体现客观数据信息,又尊重了主观能动性。对于第 j 个评价指标,其综合权重 μ_j 可表示为:

$$\mu_j = \gamma_j \cdot p_j + (1 - \gamma_j) \cdot q_j \quad (9)$$

式中: γ_j —客观折中系数, $0 \leq \gamma_j \leq 1$; p_j, q_j —由熵权法和专家主观赋值法确定的第 j 个评价指标的权重系数。

4 应用实例

某660 MW超临界火电机组采用东方锅炉(集团)有限公司生产的超临界变压直流锅炉,采用哈尔滨汽轮机厂提供的型号为N660-24.2/566/566的超临界、一次中间再热凝汽式汽轮机,机组配置两台50%额定容量的汽动给水泵。

收集该机组的运行数据,采样时间间隔为10 s,将机组功率、主蒸汽压力、主蒸汽温度作为判断机组是否处于稳态的特征参数,设置时间跨度 $t = 5$ min,利用数据预处理方法对某时段内的稳态数据进行筛选,筛选前、后数据样本对比如图3所示。

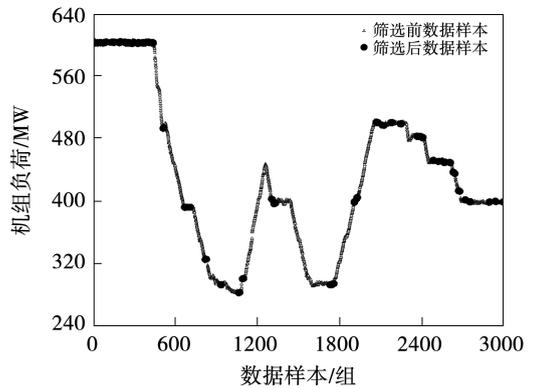


图3 筛选前、后数据样本对比

Fig. 3 Comparison of data samples before and after screening

经过筛选,数据样本由原3 000组减少至521组。由图3可知,数据预处理能够有效筛除机组处于非稳态工况的运行数据。

日常运行工况下,该机组功率为220~660 MW,该地区环境温度为 $-5 \sim 35$ °C,以10 °C为间隔,将环境温度划分为4个区间,煤质为5 000~6 000 kCal/kg,以200 kCal/kg为间隔,将煤质划分为5个区间,据此将机组日常运行工况共划分为20个区间。

经筛选获得环境温度为15~25 °C,煤质为5 800~6 000 kCal/kg的稳态运行数据,依据反平衡法^[23-24]计算获得该机组相关能效指标参数,其中发电煤耗 c_f 为:

$$c_f = \frac{q}{29.3076\eta \cdot \eta_{gd}} \quad (10)$$

式中: η_{gd} —管道效率,%; q —汽轮机热耗率,kJ/(kW·h); η —锅炉效率,%。

厂用电率 E_{cp} 可表示为:

$$E_{cp} = \frac{P_{cy}}{P_{fdj}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: P_{cy} —厂用电功率,MW; P_{fdj} —机组实际功率,MW。

供电煤耗 c_g 可表示为:

$$c_g = \frac{c_f}{1 - E_{cp}} \quad (12)$$

依据式(10)~式(12),计算获得该机组供电煤耗随机组负荷的变化如图4所示。

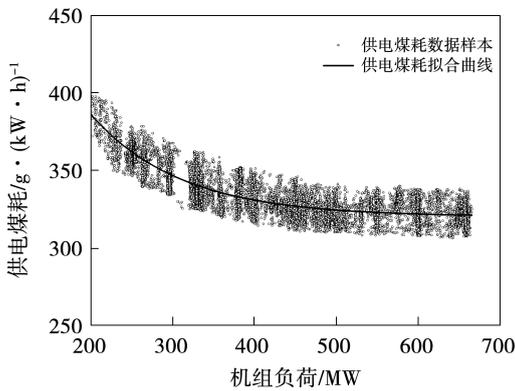


图4 供电煤耗随机组负荷的变化

Fig. 4 Variation of coal consumption for power supply with unit load

由图4可知,当该机组负荷从660 MW下降至200 MW时,供电煤耗从约320 g/(kW·h)逐步增加至约390 g/(kW·h),且负荷为350~200 MW时,供电煤耗增加较为明显。因此,为提高机组能效,在深度调峰区间开展火电机组运行优化调整,对于火电机组节能降耗具有重要意义。

将影响火电机组能效的主要设备划分为锅炉系统及汽轮机系统。锅炉系统包括锅炉本体、风烟系统和制粉系统等分系统。其中,锅炉本体指标选取锅炉效率、排烟热损失和不完全燃烧热损失;风烟系统指标选取排烟温度、排烟氧量、空气预热器漏风率和各风机耗电率;制粉系统指标选取磨煤机单耗和单台磨煤机耗电率。汽轮机系统包括汽轮机本体、回热系统与冷端系统等分系统。根据各分系统对能效的影响,汽轮机本体系统指标选取汽轮机热耗率、进口蒸汽参数和排汽压力;回热系统指标选取加热器给水端差、加热器疏水端差和给水温度;冷端系统指标选取凝汽器真空、凝结水温升、凝结水过冷度和凝汽器温升。

将上述分系统的指标共同构成参数向量 \mathbf{x} ,选取供电煤耗作为反映机组整体的能效指标 y 。

对于获得该区间内的数据样本,根据专家知识经验按照供电煤耗的优劣将其划分为较好、好、一般、差和较差5类,设定权重范围分别为1.0~0.9,0.9~0.7,0.7~0.5,0.5~0.3和0.3~0,每类中各样本权重按照式(7)进行确定。采用WSVM建立火电机组能效寻优模型。为了便于比较,将该方法与聚类方法获得的机组在能效最优状态下的供电煤耗

曲线进行对比。在聚类方法中,采用模糊 c -均值聚类算法,根据轮廓系数法确定聚类数,利用获得的供电煤耗最低的聚类中心进行曲线拟合,对比结果如图5所示。

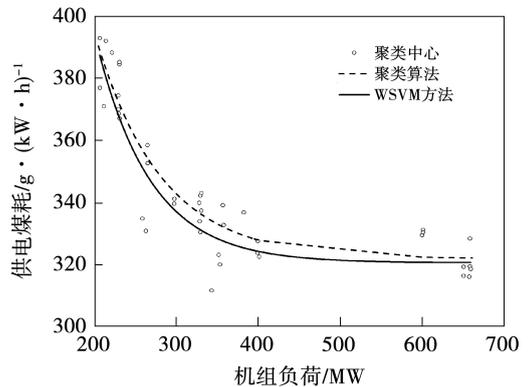


图5 基于聚类与WSVM方法获得的供电煤耗曲线对比
Fig. 5 Comparison of coal consumption curves for power supply based on clustering and WSVM method

由图5可知,与聚类方法相比,WSVM建模方法更重视能效指标较优的数据样本,在30%~100%额定负荷区间,获得的供电煤耗值较聚类算法低0.9~4.8 g/(kW·h),在相同工况下获得的机组供电煤耗更低,更能表征机组的能效最优状态,为进一步深层次挖掘火电机组节能潜力提供了依据。

依据上述方法,在约35%负荷点获得的汽轮机本体系统中由主蒸汽压力、主蒸汽温度、汽轮机热耗率和排汽压力等构成的最优向量 $\bar{\mathbf{x}}$ 为:

$$\bar{\mathbf{x}} = [10.1 \ 563.6 \ 7494.8 \ -91.1] \quad (13)$$

将最优向量 $\bar{\mathbf{x}}$ 中的各参数作为该工况下的最优值,与过程值进行对比,利用模糊评价模型对各参数进行量化评价。图6~图7为利用模糊评价模型评价主蒸汽压力、主蒸汽温度的结果。

由图6~图7可知,建立的Mamdani模糊评价模型的输出结果能够较为准确、及时地反映出相应参数的变化趋势,评价结果采用百分制形式,便于运行人员准确判断运行参数的状态,为机组的运行优化调整提供参考。

为了表征各参数对汽轮机本体系统性能的影响程度,通过式(9)主客观相结合的方法确定各参数的权重系数。各参数客观折中系数均为0.45,获得汽轮机本体系统主蒸汽温度、主蒸汽压力、汽轮机热

耗率的排汽压力 4 项指标的加权系数分别为 0.28, 0.29, 0.22 和 0.21。通过对 4 项指标的评价结果进行加权,可获得汽轮机本体系统的评价结果,如图 8 所示。

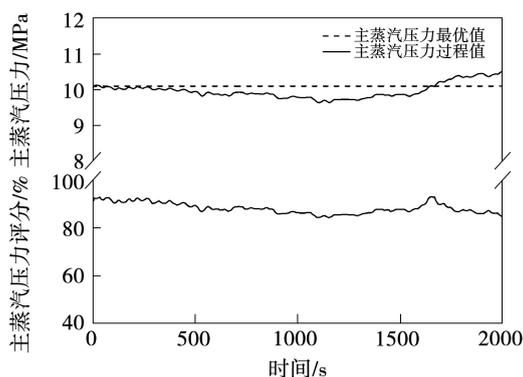


图 6 主蒸汽压力曲线及评价结果

Fig. 6 Main steam pressure curve and evaluation result

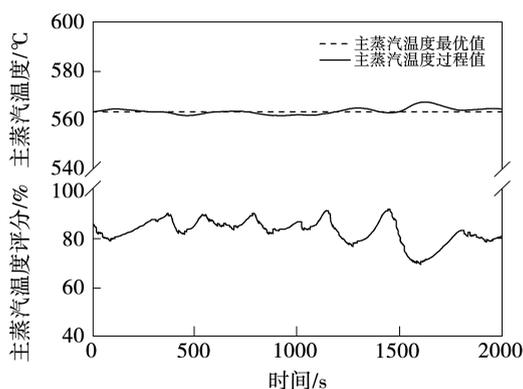


图 7 主蒸汽温度曲线及评价结果

Fig. 7 Main steam temperature curve and evaluation results

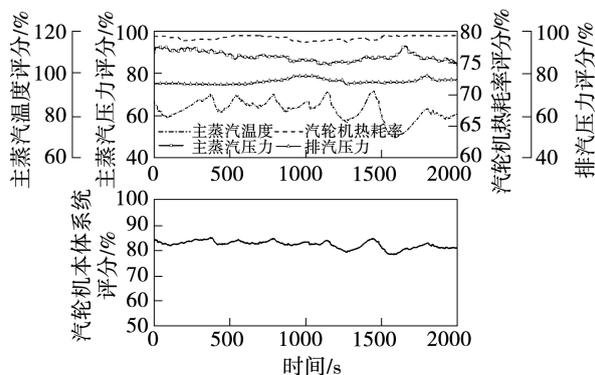


图 8 汽轮机本体系统运行状态评价结果

Fig. 8 Evaluation results of operating status of steam turbine ontology system

由图 8 可知,根据该参数在评价系统中的重要程度,通过加权可实现对该系统整体性能的实时量化评价。根据对各参数及汽轮机本体系统的评价结果,可快速、准确判断各参数及分系统的运行状态,为机组运行优化调整提供指导。

同样,通过对火电机组锅炉、汽轮机等分系统的评价结果进行加权,可获得锅炉、汽轮机以及机组整体的综合评价结果,据此表征火电机组整体及各分系统的运行状态。获得的评价结果由各主要运行参数作为支撑,较为直观、具体,便于运行人员快速定位影响机组性能的分系统及运行参数,从而辅助运行人员实现对机组的“智慧监盘”。

5 结论

(1) 利用火电机组的运行数据,采用 WSVM 建立了火电机组能效模型。该模型通过样本加权使模型训练结果具有能效自寻优功能,能够较好地表征火电机组的能效最优状态,为判断火电机组节能降耗空间提供了依据。

(2) 根据建立的能效模型获得机组在能效最优状态下的主要指标及参数,并通过 Mandani 模糊评价模型实现了对各指标、参数以及机组运行状态的实时量化评价。

(3) 通过某 660 MW 超临界火电机组的应用实例对基于 WSVM 的火电机组能效寻优及运行状态评价方法的有效性进行了验证。结果表明,该方法可为火电机组的节能优化运行提供参考,也为“智慧监盘”提供了一种解决思路。

参考文献:

- [1] 李波,张文乾,刘维,等.基于熵权层次法的油浸式变压器绝缘状态评价[J].电力工程技术,2023,42(4):223-230.
LI Bo, ZHANG Wenqian, LIU Wei, et al. Insulation condition evaluation of oil-immersed transformer based on entropy weight hierarchy method [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4):223-230.
- [2] 计蓉,侯慧娟,盛戈皞,等.基于组合赋权法和模糊综合评价的电力设备状态数据质量评估[J].高电压技术,2024,50(1):274-281.
JI Rong, HOU Huijuan, SHENG Gehao, et al. Data quality assessment for power equipment condition based on combination weighing method and fuzzy synthetic evaluation [J]. High Voltage Engineer-

- ing,2024,50(1):274-281.
- [3] 王志杰,陈文,朱晓星,等.基于数据驱动的火电机组灵活性综合评价方法及应用[J].现代电力,2024,41(4):667-672.
WANG Zhijie, CHEN Wen, ZHU Xiaoxing, et al. Comprehensive evaluation method for thermal power unit flexibility based on data-driven and its application [J]. Modern Electric Power, 2024, 41(4):667-672.
- [4] 白翎.火电厂重要辅助设备可靠性状态识别研究[J].热力发电,2017,46(11):25-31.
BAI Ling. Reliability state identification for key auxiliary equipments in thermal power units [J]. Thermal Power Generation, 2017,46(11):25-31.
- [5] 宋莹,张钟镭.基于多元状态估计和超椭球分析的汽轮机运行状态监测[J].动力工程学报,2020,40(2):138-144.
SONG Ying, ZHANG Zhonglei. Steam turbine condition monitoring based on multivariate state estimation technique and hyper-ellipsoid analysis [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020,40(2):138-144.
- [6] 姜龙,程亮,李金晶,等.燃煤电厂湿法脱硫浆液品质及喷淋层运行状况定量评价[J].中国电力,2023,56(11):217-225.
JIANG Long, CHENG Liang, LI Jinjing, et al. Quantitative evaluation of wet desulfurization slurry quality and spray layer operation in coal-fired power plants [J]. Electric Power, 2023, 56(11):217-225.
- [7] 李晖,刘栋,姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18):6245-6259.
- [8] 胡鞍钢.中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J].北京工业大学学报(社会科学版),2021,21(3):1-15.
HU Angang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches [J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3):1-15.
- [9] GU Yujiong, XU Jing, CHEN Dongchao, et al. Overall review of peak shaving for coal-fired power units in China [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 54:723-731.
- [10] 杨志平,李柯润,王宁玲,等.大数据背景下燃煤发电机组调峰经济性分析[J].中国电机工程学报,2019,39(16):4808-4818.
YANG Zhiping, LI Kerun, WANG Ningling, et al. Economic analysis of peaking regulation of coal-fired generating units under big data [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16):4808-4818.
- [11] 张宇,田亮.基于PCA和改进TOPSIS法的火电机组运行综合评价[J].华北电力大学学报(自然科学版),2023,50(3):110-116.
ZHANG Yu, TIAN Liang. Comprehensive evaluation of operation of thermal power units based on PCA and improved TOPSIS method [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2023, 50(3):110-116.
- [12] 王宇,李琳娜,王瑛,等.内蒙古火电行业能效水平分析集优化路径研究-基于SBM模型机GML指数模型的分析[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2023,54(3):310-320.
WANG Yu, LI Linna, WANG Ying, et al. Analysis of energy efficiency level and optimization path of thermal power industry in inner Mongolia: Analysis based on SBM model and GML index model [J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2023, 54(3):310-320.
- [13] 孙宇贞,唐毅伟,李帅.基于数据挖掘的火电厂制粉系统能效评估模型研究[J].热能动力工程,2021,36(2):80-85.
SUN Yuzhen, TANG Yiwei, LI Shuai. Research on evaluation model of energy efficiency for pulverizing system based on data mining [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(2):80-85.
- [14] 李明佳,宋晨希,陶文铨.基于GARCH模型的火电厂综合能效影响因素分析[J].工程热物理学报,2016,37(8):1607-1612.
LI Mingjia, SONG Chenxi, TAO Wenquan. An econometric analysis for the energy efficiency indicators in thermal power plants based upon the GARCH model [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(8):1607-1612.
- [15] 陈婷,司凤琪,顾慧,等.一种基于改进KFCM算法的火电厂煤耗特性模型的建立方法[J].热能动力工程,2017,32(3):68-74.
CHEN Ting, SI Fengqi, GU Hui, et al. A coal consumption modeling method for power plant based on improved KFCM algorithm [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(3):68-74.
- [16] 徐婧,顾煜炯,王仲,等.基于数据挖掘的煤电机组能效特征指标及其基准值的研究[J].中国电机工程学报,2017,37(7):2009-2015.
XU Jing, GU Yujiong, WANG Zhong, et al. Research on indexes of energy efficiency and its reference-value for coal-fired power units based on data-mining [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7):2009-2015.
- [17] 胡阳,杨泽,房方,等.火电机组供电碳减排高维运行特征提取及其最优基准值确定[J].中国电机工程学报,2021,41(S1):210-220.
HU Yang, YANG Ze, FANG Fang, et al. High dimensional operation feature extraction and optimal reference value determination of carbon emission reduction for power supply of thermal power units [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1):210-220.
- [18] LIN Chunfu, WANG Shengde. Fuzzy support vector machine [J]. IEEE Transactions on Neural Network, 2002, 13(2):464-471.

- [19] 付 鹏,王宁玲,杨勇平,等. 多变边界火电机组能耗基准状态表征方法[J]. 工程热物理学报,2015,36(3):468-473.
FU Peng, WANG Ningling, YANG Yongping, et al. The mechanism of energy-consumption benchmark in coal-fired units with varying boundary [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015,36(3):468-473.
- [20] 石宜金,谭贵生,赵 波,等. 基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022,50(21):167-176.
SHI Yijin, TAN Guisheng, ZHAO Bo, et al. Condition assessment method for power transformers based on fuzzy comprehensive evaluation and information fusion [J]. Power System Protection and Control, 2022,50(21):167-176.
- [21] 吴春华,俞薛颖,李智华,等. 基于 FCM 与高斯隶属度的光伏组件健康状态诊断[J]. 电网技术,2022,46(5):1887-1896.
WU Chunhua, YU Xueying, LI Zhihua, et al. Health state diagnosis of photovoltaic modules based on FCM and Gaussian membership [J]. Power System Technology, 2022,46(5):1887-1896.
- [22] 程志友,陶 青,朱唯韦,等. 基于改进模糊综合评判法的空压机状态评估[J]. 电测与仪表,2020,57(3):12-18.
CHENG Zhiyou, TAO Qing, ZHU Weiwei, et al. State evaluation of air compressor based on improved fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020,57(3):12-18.
- [23] GB/T 10184-2015, 电站锅炉性能试验规程[S].
GB/T10184-2015, Performance test code for utility boiler[S].
- [24] DL/T 904-2015, 火力发电厂技术经济指标计算方法[S].
DL/T 904-2015, Calculating method of economical and technical index for thermal power plant[S].

(王治红 编辑)

(上接第 49 页)

- [11] 刘 靖,胡二江,黄佐华,等. RP-3 航空煤油与其模型燃料雾化特性的对比试验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(4): 765-773.
LIU Jing, HU Erjiang, HUANG Zuohua, et al. Comparative experiment of atomization characteristics of RP-3 kerosene and surrogate fuel [J]. Journal of Aerospace Power, 2022,37(4):765-773.
- [12] FU Qingfei, YANG Lijun, QU Yuanyuan, et al. Linear stability analysis of a conical liquid sheet [J]. Journal of Propulsion and Power, 2010,26(5):955-968.
- [13] CAI Wenzhe, LI Wei, ZHAO Yiyu, et al. Experimental research on the influence of aviation fuel temperature on swirl nozzle velocity [J]. Fuel, 2021,289:119765.
- [14] WARNCKE K, GEPPERTEH S, SAUER B, et al. Experimental and numerical investigation of the primary breakup of an airblasted liquid sheet [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 91(3):208-224.
- [15] KUMAR A, SAHU S. Influence of nozzle geometry on primary and large-scale instabilities in coaxial injectors [J]. Chemical Engineering Science, 2020,221:115694.
- [16] 赵乾鹏,杨金虎,刘存喜,等. 多级旋流空气雾化喷嘴高空气动雾化场的数值研究[J]. 航空动力学报, 2021, 36(12): 2555-2567.
ZHAO Qianpeng, YANG Jinhua, LIU Cunxi, et al. Numerical investigation of high altitude aerodynamic and spray fields for multi-swirl airblast atomizer [J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(12):2555-2567.
- [17] 刘 娟. 旋转锥形液膜破碎过程实验与仿真研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2012.
LIU Juan. Experimental and numerical simulation of the breakup process of swirling conical liquid sheet [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [18] COOPER D, YULE A J. Waves on the air core/liquid interface of a pressure swirl atomizer [C]. Zurich: ILASS-Europe, 2001.
- [19] SQUIRE H B. Investigation of the instability of a moving liquid film [J]. British Journal of Applied Physics, 1953,4:167-169.
- [20] 高 翔,王 方,肖阳春,等. 甩油盘雾化实验台开发和验证. 清华大学学报(自然科学版), 2020,60(3):212-218.
GAO Xiang, WANG Fang, XIAO Yangchun, et al. Development and verification of a fuel slinger atomization test bench [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(3):212-218.

(刘 颖 编辑)