

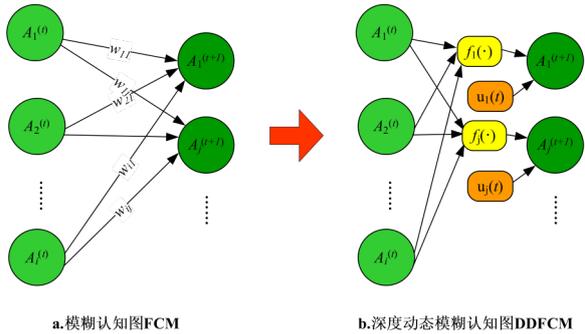
基于深度动态模糊认知图的空气质量预测与影响分析技术

1 技术背景

随着大数据、机器学习与人工智能（AI）等方法的不断发展，“黑箱”式预测方法的性能得以显著提高，但因无法明确预测背后的逻辑，即不具有可解释性，致使结果不可控，限制了在经济管理领域的广泛应用。“白箱”式模糊认知图因其在因果解释、推理预测等方面的优势而在许多管理决策中得以应用，但目前模糊认知图模型多描述静态和线性关系且预测能力欠佳。如何提高模糊认知图的预测能力，拓展其对复杂关系的可解释性，促进其更广泛推广应用（如空气质量防控）已成为模糊认知图与可解释预测理论及其应用所面临的科学问题。

2 技术方案与创新

突破模糊认知图中静态、线性关系的特性，使用深度神经网络刻画模糊认知图中的动态、非线性关系，构建深度动态模糊认知图，基于函数的梯度下降方法辨识深度动态模糊认知图模型（FCM）中的参数，建立可以实现高性能预测的深度模糊认知图理论模型（DDFCM）。提出深度动态模糊认知图的多维时间序列预测方法、不同类型关系的可解释度量方法，并将此应用于空气质量可解释预测。



Algorithm 1 The AFGD algorithm.

- 1: **Input:** Training dataset $D = \{(t, \mathbf{a}^{(t)}, z_j^{(t)})\}_{t=1}^T$.
- 2: Initialize θ_f, θ_u randomly.
- 3: Initialize $y_j^{(t)} \leftarrow z_j^{(t)}$ for $t \in [1, T]$.
- 4: **repeat**
- 5: $\theta_f \leftarrow \text{BP}(f_j(\theta_f), \{(\mathbf{a}^{(t)}, y_j^{(t)})\}_{t=1}^T)$
- 6: $y_j^{(t)} \leftarrow z_j^{(t)} - f_j(\mathbf{a}^{(t)}|\theta_f)$ for $t \in [1, T]$
- 7: $\theta_u \leftarrow \text{BP}(u_j(\theta_u), \{(t, y_j^{(t)})\}_{t=1}^T)$
- 8: $y_j^{(t)} \leftarrow z_j^{(t)} - u_j(t|\theta_u)$ for $t \in [1, T]$
- 9: **until** convergence
- 10: **return** θ_f, θ_u

$$a_{ij}^{(t+1)} = \varphi(u_j(t) + f_j(\mathbf{a}^{(t)}))$$

$$y_{(K+1)}^{(t+1)} = \sum_{n=1}^{M_K} v_{(n1, K+1)} y_{(n, K)}^{(t)} = f_j(\mathbf{a}^{(t)})$$

$$u_j(t) = \text{RNN}(t, \text{mod}(t, \tau), u_j(t-1))$$

$$r_{ij}(\mathbf{a}) = \lim_{\Delta a_i \rightarrow 0} \frac{f_j(a_i, \mathbf{a}_{-i}) - f_j(a_i + \Delta a_i, \mathbf{a}_{-i})}{a_i - (a_i + \Delta a_i)} = \frac{\partial f_j(\mathbf{a})}{\partial a_i}$$

$$\bar{r}_{ij}(a_k) = \frac{1}{M} \sum_{a_k \in [\alpha, \beta]} r_{ij}(a_k, \mathbf{a}_{-k})$$

$$\bar{r}_{ij}^{(O)} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M r_{ij}(\mathbf{a}^{(m)})$$

使用 DFCM-1L(DFCM 使用 1 层 ANN 表达 f 与 u 函数)、DFCM-3L(DFCM 使用 3 层 ANN 表达 f 与 u 函数)、 f_i -1L(DFCM 使用 1 层 ANN 表达 f 、无 u 函数)、 f_i -3L(DFCM 使用 3 层 ANN 表达 f 、无 u 函数)、FCM、ANN、VAR、LSTM、LSTM-U、ARIMA、W-HFCM、Naive、ES 进行预测。

3 技术创新点

- (1) 面向可解释预测的深度动态模糊认知图建模；
- (2) 深度动态模糊认知图中关系的可解释度量方法；

(3) 数据驱动下的空气质量可解释预测。

4 应用案例

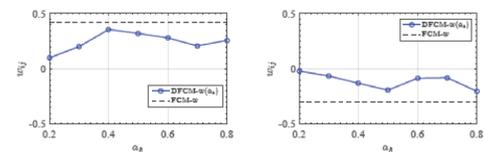
将上述方法用于北京地区空气质量预测中,基于均方根误差得到以下预测结果,结果显示DFCM方法优于其他预测方法。

Dataset	Target Features	DFCM	FCM	ANN	VAR	LSTM	LSTM-U	ARIMA	W-HFCM	Naive	ES
AQIs	PM _{2.5}	12.73	29.25	23.38	18.99	12.84	14.17	24.11	14.72	27.06	70.55
	NO ₂	9.622	16.01	12.06	14.85	9.657	9.716	19.35	9.900	22.24	42.66
	CO	0.264	0.728	0.719	0.346	0.269	0.270	0.440	0.617	0.487	1.012
	O ₃	8.504	15.30	13.02	14.47	8.713	9.995	16.93	20.86	20.72	40.11
	SO ₂	2.732	6.044	4.513	3.638	2.860	3.041	4.161	4.035	4.778	7.433

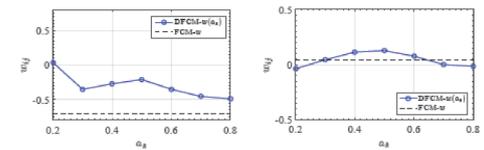
使用DFCM用于北京地区空气质量预测、气象条件对空气质量影响分析中,预测误差及影响分析如下所示。

	DFCM-1L	DFCM-3L	f_i-1L	f_i-3L	FCM
PM2.5	18.95	12.73	21.42	20.425	29.25
NO2	10.46	9.622	10.68	10.39	16.01
CO	0.315	0.264	0.335	0.319	0.728
O3	9.346	8.504	14.61	12.95	15.30
SO2	4.246	2.732	5.008	4.609	6.044
Overall	6.143	4.832	7.361	6.864	10.47

	PM2.5	NO2	CO	O3	SO2
Temp.	-0.53	-0.85	-0.76	0.42	-0.36
Pressure	-0.39	-0.50	-0.53	-0.30	-0.14
Humidity	-0.37	-0.30	-0.28	-0.71	-0.29
Wind	-0.19	-0.55	-0.31	0.04	-0.21



(a) a_k :Temp., w_{ij} :Temp. \rightarrow O3 (b) a_k :Pressure, w_{ij} :Pressure \rightarrow O3



(c) a_k :Humid., w_{ij} :Humid. \rightarrow O3 (d) a_k :Wind, w_{ij} :Wind \rightarrow O3

5 对接联系

联系人: 彭珍 (经济管理学院 教授)

邮箱: pengzhen@bupt.edu.cn