

·仿真计算与测试·

汽轮发电机密封油冷却系统模糊建模与仿真研究

[摘要] 在火力发电厂电站仿真研究中,汽轮发电机密封油冷却系统是一个复杂系统。文中对模糊建模方法进行了研究,并对汽轮发电机密封油冷却系统进行了模糊建模,取得了满意的结果。

关键词 模糊辨识 模糊聚类 线性插值 卡尔曼滤波
汽轮发电机 密封油冷却系统

中图分类号 TM311;O242.1

1 引言

在火力发电厂电站仿真的开发研究中,汽轮发电机密封油冷却系统是一个多输入多输出的复杂系统。该系统用于冷却汽轮机的轴承。以往的建模方法采用流体网络的计算方法,从机理上建立系统的模型,其结构复杂变化多样。流体的压力和流体响应特性具有较强的非线性,同时流体网络系统数学模型中各个方程之间耦合关系较强,给数学模型的求解带来一定的困难。

本文采用模糊辨识方法对汽轮发电机密封油冷却系统进行了研究,建立该系统的模糊模型。经过模型检验和对现场的实际检验都取得了满意的结果。

2 模糊聚类方法和插值计算

2.1 模糊聚类方法

给定样本集合 $A = \{X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_n\}$, $X_k \in R^r$ 。定义如下目标函数:

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^2 \hat{\sigma}_k \quad \hat{\sigma}_k = \|X_k - Z_i\|^2 \quad (1)$$

其中, Z_i 为第 i 个聚类中心。 μ_{ik} 表示第 k 个数据在第 i 类中隶属度,且满足:

$$\sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1, 0 < \sum_{k=1}^n \mu_{ik} < n, k = 1, 2, \dots, n, \\ i = 1, 2, \dots, c, \quad \mu_{ik} \in [0, 1]$$

(哈尔滨工业大学) 王宏伟 张 彤 王子才
根据文献 [1],可按下面聚类算法保证(1)最小。其算法详细过程如下:

1)选择聚类数 c 及 $U^{(0)}$, $U^{(0)} = [\mu_{ik}]_{c \times n}^{(0)}$

$$2) \text{计算聚类中心:} \quad Z_i = \frac{\sum_{k=1}^n x_k (\mu_{ik})^2}{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^2}$$

$i = 1, 2, \dots, c$ (2)

3)将 $U^{(l)}$ 更新为 $U^{(l+1)}$

$$\mu_{ik} = \left[\sum_{j=1}^c \left(\frac{\|X_k - Z_i\|}{\|X_k - Z_j\|} \right)^2 \right]^{-1} \quad i = 1, 2, \dots, c$$

$k = 1, 2, \dots, n$ (3)

4)如果 $\|U^{(l)} - U^{(l+1)}\| \leq \lambda$, λ 为阈值,则停止,否则 $l = l + 1$, 转 2)

确定完 J , 根据(4)确定最佳聚类数 c^* 。

$$S = J / nd_{\min} \quad (4)$$

式(4)中, n 表示样本的个数, d_{\min} 为聚类中心之间的最小距离,即 $d_{\min} = \min_{i,j} \|Z_i - Z_j\|^2$ 。

目标函数 S 中, J 表示了聚类数为 c 时的模糊聚类效果, d_{\min} 表达了分类数对指标函数 J 的影响。由于 J 和 d_{\min} 的相互作用,可以找到一个使 J 最小的最佳聚类数 c 。这样描述系统就需要 c 条规则。经过模糊聚类后,将隶属函数矩阵向各个输入变量进行投影,就可确定各个输入变量的隶属函数。

2.2 采用线性插值对新数据隶属度的计算

当给定一个新数据 x_k 时, $x_k \in R$, 这里不必对该数据重新进行聚类,而是基于模糊聚类确定的参考模糊集合,采用插值方式计算 x_k 的隶属度。令 Ω 为变量 x 的样本数据集合。

一般考虑三种情况:(1) $x_k < \min(\Omega)$; (2) $x_k > \max(\Omega)$; (3) $\min(\Omega) < x_k < \max(\Omega)$

这里仅就情况 1 进行讨论,用插值方式计算 x_k 在各类中的隶属度,另外两种情况与此相类似处理。在情况 1 中考虑两种情况:

(1) $x_k < x_f < x_s$, $\mu_{if} > \mu_{is}$, x_f 和 x_s 分别是 Ω 中

的最小值和次最小值, μ_{if} 和 μ_{is} 分别是 x_f 和 x_s 在第 i 类的隶属度。于是

$$\mu_{ik} = \max\left\{ \mu_{is} - \frac{(x_s - x_k)(\mu_{is} - \mu_{if})}{(x_s - x_f)}, 0 \right\} \quad (5)$$

$$(2) x_k < x_f < x_s, \mu_{if} < \mu_{is},$$

$$\mu_{ik} = \min\left\{ \mu_{is} + \frac{(x_s - x_k)(\mu_{is} - \mu_{if})}{(x_s - x_f)}, 1 \right\} \quad (6)$$

情况 2: $x_k > \max(\Omega)$

(1) $x_k > x_f > x_s, \mu_{if}' < \mu_{is}'$, x_f' 和 x_s' 分别是 Ω 中最大值和次最大值, μ_{if}' 和 μ_{is}' 是它们的隶属度。

$$\mu_{ik}' = \max\left\{ \mu_{is}' - \frac{(x_s' - x_k)(\mu_{is}' - \mu_{if}')}{(x_s' - x_f')}, 0 \right\} \quad (7)$$

$$(2) x_k > x_f' > x_s', \mu_{if}' > \mu_{is}'$$

$$\mu_{ik}' = \min\left\{ \mu_{is}' + \frac{(x_s' - x_k)(\mu_{is}' - \mu_{if}')}{(x_s' - x_f')}, 1 \right\} \quad (8)$$

情况 3: $\min(\Omega) < x_k < \max(\Omega)$, x_f'' 和 x_s'' 分别是 Ω 中的元素, x_k 在 x_f'' 和 x_s'' 之间。

$$\mu_{ik}'' = \min\left\{ \mu_{is}'' + \frac{(x_s'' - x_k)(\mu_{is}'' - \mu_{if}'')}{(x_s'' - x_f'')}, 1 \right\} \quad (9)$$

3 模糊辨识方法

设辨识对象为 $P(U, Y)$, U 为系统的输入, y 为系统的输出, $U \in R^r, Y \in R^q$, 因为对于这样的 MIMO 系统, 可以分解为 q 个子系统进行辨识, 因此这里只讨论 MISO 系统的辨识。

设系统的模糊模型为 $T-S$ 模糊模型^[2], 模型的结构是由模糊聚类分析所确定的。其模型如下:

R_1 : if u_1^k is μ_{i1}^k , and ... and, u_r^k is μ_{ir}^k then $y_1^k = b_{10} + b_{11}u_1^k + \dots + b_{1r}u_r^k$

.....

R_c : if u_1^k is μ_{c1}^k , and ... and, u_r^k is μ_{cr}^k then $y_c^k = b_{c0} + b_{c1}u_1^k + \dots + b_{cr}u_r^k$ (10)

其中 k 表示第 k 次采样。系统的输出可表示为:

$$y^k = \sum_{i=1}^c w_i^k y_i^k = \sum_{i=1}^c v_i^k y_i^k = \sum_{i=1}^c v_i^k (b_{i0} + b_{i1}u_1^k + \dots + b_{ir}u_r^k) \quad (11)$$

$$w_i^k = \mu_{i1}^k \wedge \mu_{i2}^k \wedge \dots \wedge \mu_{ir}^k \quad (12)$$

这里 μ_{ik} 是由前面模糊聚类得出的。

$$\text{定义目标函数为: } J = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - y^k)^2 \quad (13)$$

式(13)中 y_k 是系统的实际值, y^k 是模型输出值。

通过求 J 的最小化求参数 b_{ij} ($i = 1, 2, \dots, c, j$

$= 1, 2, \dots, r$)

$$\text{定义: } Y = [y_1 y_2 \dots y_n]^T \quad (14)$$

$$P = [b_{10} \dots b_{c0} \dots b_{11} \dots b_{c1} \dots b_{1r} \dots b_{cr}]^T$$

$$X = \begin{bmatrix} v_1^1 \dots v_c^1 & v_1^1 u_1^1 \dots v_c^1 u_1^1 & \dots & v_1^1 u_r^1 \dots v_c^1 u_r^1 \\ v_1^2 \dots v_c^2 & v_1^2 u_1^2 \dots v_c^2 u_1^2 & \dots & v_1^2 u_r^2 \dots v_c^2 u_r^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_1^n \dots v_c^n & v_1^n u_1^n \dots v_c^n u_1^n & \dots & v_1^n u_r^n \dots v_c^n u_r^n \end{bmatrix} \quad (16)$$

由下面公式求得参数向量 P :

$$P = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (17)$$

当测量足够多的无噪声数据时, 这样的辨识方法可以得到和原始系统一样的参数。但实际测量数据是有噪声的, 所以采用滤波计算方法。因此, 在实际中, P 是由静态卡尔曼滤波器求得的。静态卡尔曼滤波器是一种算法, 这种算法以偏差最小平方取线性代数方程的参数。其具体算法如下:

$$P_{i+1} = P_i + \frac{S_{i+1} * S_{i+1}^T * (y_{i+1} - X_{i+1} * P_i)}{1 + X_{i+1} * S_i * X_{i+1}^T} \quad (18)$$

$$S_{i+1} = S_i + \frac{S_i * X_{i+1}^T * X_{i+1} * S_i}{1 + X_{i+1} * S_i * X_{i+1}^T} \quad (19)$$

这里 X_{i+1} 表示式(16)的第 $i+1$ 个行向量。 y_i 是 Y 中的第 i 个元素。 P 是结论参数向量。 S 为静态卡尔曼滤波器的增益。 $P_0 + \text{zero}$ (zero 为零向量), $S_0 = \alpha * I$, α 一般取很大的正整数, I 为单位阵。

本文提出辨识算法总结如下:

1) 初始设置 c , 给定 μ_{ik} 的初始值 ($i = 1, 2 \dots c, k = 1, 2 \dots, n$)

2) 根据模糊聚类算法对样本点集合 $\{U, Y\}$ 进行聚类, 确定最佳聚类数, 将隶属函数矩阵向各输入变量轴上进行投影, 确定系统的模糊空间和各输入变量的隶属度函数、参考模糊集合。

3) 对任意输入样本通过各输入变量的参考模糊集合进行插值计算, 确定其隶属度。

4) 通过式(16)形成 X 。

5) 采用式(18)和(19)求得 P 。

6) 计算性能

$$\text{指标 } J [J = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - y^k)^2] \text{。 如}$$

果 J 小于阈值,

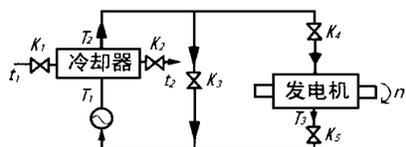


图 1 汽轮发电机密封油冷却系统

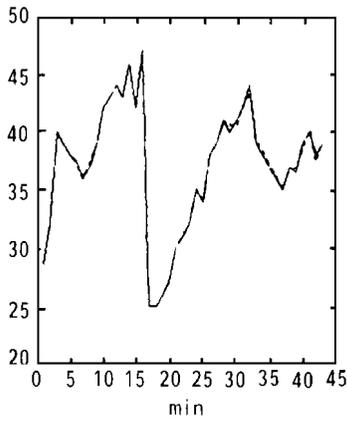


图 2 温度 T_1 变化曲线

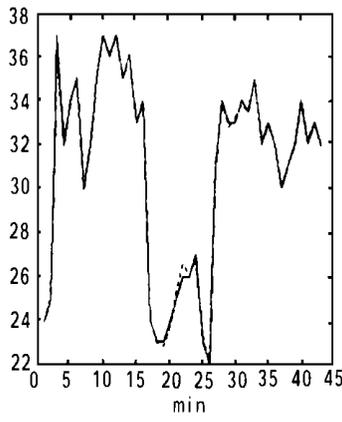


图 3 温度 T_2 变化曲线

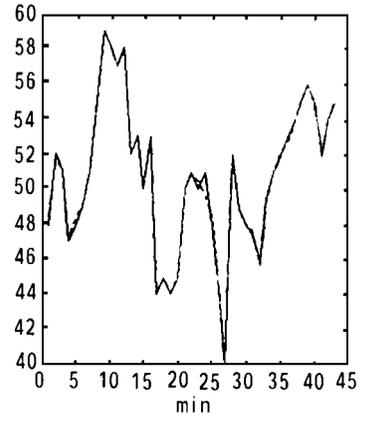


图 4 温度 T_3 变化曲线

表 1 辨识结果与检验结果

	系统 1	规则数	系统 2	规则数	系统 3	规则数	系统 4	规则数
辨识精度	0.0433	9	0.0712	10	0.0562	8	0.0320	9
检验精度	0.1012	9	0.1303	10	0.1401	8	0.1512	9

则结束, 否则转 4)。

4 汽轮机密封油冷却系统模糊建模

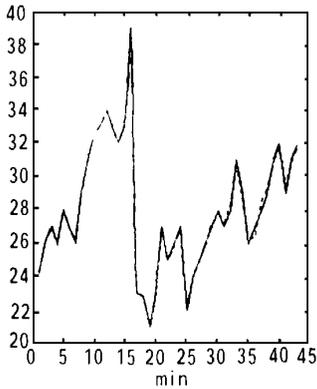


图 5 温度 t_2 变化曲线

在火电厂电站仿真中, 汽轮发电机密封油冷却系统是一个多输入多输出的系统。其系统原理图如图 1 所示。采用本文模糊建模方法建立某 200 MW 火力发电厂电站仿真汽轮发电机密封油冷却系统的温度模型。考

虑仿真器的实际情况, 及根据现场操作人员的实际操作, 将现场采集的数据进行建模(由于篇幅有限, 数据采集详细过程省略)。这个系统分解成四个多输入单输出的系统。

系统 1: k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 阀门开度和转速 n 作为输入, 温度 T_1 变化量作为输出。

系统 2: k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 阀门开度和转速 n 作为输入, 温度 T_2 变化量作为输出。

系统 3: k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 阀门开度和转速 n 作为输入, 温度 T_3 变化量作为输出。

系统 4: k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 阀门开度和转速 n 作

为输入, 温度 t_2 变化量作为输出。

其辨识结果如下: 图 2 是温度 T_1 的变化曲线, 图 3 是温度 T_2 的变化曲线, 图 4 是温度 T_3 的变化曲线; 图 5 是温度 t_2 的变化曲线。图中, 实线为实测曲线, 虚线为辨识模型输出曲线, 图中纵轴为温度, 单位为度; 横轴为时间, 单位为分钟。

表 1 列出了本方法对系统辨识的精度(模型输出与实测值的均方误差)、模型检验误差(模型输出与检验样本的均方误差)。

5 结论

汽轮发电机密封油冷却系统是一个复杂系统, 采用模糊建模方法对其建模仿真研究是一种新的尝试。该模糊建模方法利用带有评价准则的模糊聚类技术确定系统的模糊空间, 简化了模糊系统的结构。利用卡尔曼滤波估计模型的后件参数, 利用线性插值计算样本数据的隶属度。在对汽轮发电机密封油冷却系统建模研究中取得了满意的效果。

参考文献

- 1 XuanLi L X and Gerardo B. A validity measure for fuzzy clustering. IEEE Trans., Pattern Anal. Machine Intel., 1991, 13(8): 841 ~ 847
- 2 Takagi T and Sugeno M. Fuzzy identification of system and its applications to modeling and control. IEEE Trans., on System Man Cybernet, 1985, 15(1): 16 ~ 32
- 3 Wang Liang. Complex systems modeling via fuzzy logic. IEEE Trans., on System Man Cybernet, 1996, 26(1): 100 ~ 106

—design conditions. **Key words:** design system, naval steam turbine, S_2 stream surface, three—dimensional calculation, loss

卧式内燃油和燃气锅炉的结构和设计 = **Construction and Design of Oil—fired and Gas—fired Horizontal Boilers** [刊, 中] /Gao Yukuan, et al (Harbin Municipal Labor Bureau) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (2) —122~124

Discussed in this paper are the overall construction and design of oilfired and gas—fired horizontal boilers. Put forth are the requirements for the design of the furnace, tail heating surfaces and burners for such boilers. **Key words:** oil—fired boiler, gas—fired boiler, overall construction, design

汽轮发电机密封油冷却系统模糊建模与仿真研究 = **Fuzzy Model Creation and the Simulation Study of a Turbogenerator Seal Oil Cooling System** [刊, 中] /Wang Hongwei, Zhang Tong, Wang Zicai (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (2). —125~127

The seal oil cooling system of a turbogenerator constitutes a complicated system in the simulation study of thermal power plants. After a study of the fuzzy model creation method the authors constructed a fuzzy model for a turbogenerator seal oil cooling system with satisfactory results being attained. **Key words:** fuzzy identification, fuzzy clustering, linear interpolation, Kalman filter, turbogenerator seal oil cooling system

双线圈电液转换器的可靠性分析 = **Reliability Analysis of a Double—coil Electro—hydraulic Converter** [刊, 中] /Yu DaRen, Xujiyu (Harbin Institute of Technology), Wang Hongbin, Yang Ge, Lin Bingjian (Harbin Turbine Co. Ltd.) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (2). —128~130

A dynamic mathematical model is set up for a double—coil electro—hydraulic converter and a simulation analysis conducted of the coil broken wire fault. It is shown that the double—coil structure used for the electro—hydraulic converter of zero—steady current type can significantly enhance its reliability. **Key words:** electro—hydraulic converter, double—coil, reliability, fault tolerance

考虑变比热的冷却涡轮弯曲叶栅流场的数值模拟 = **Numerical Simulation of a Cooled Turbine Curved Cascade Flow Field with Variable Specific Heat Being Taken into Account** [刊, 中] /Chen Fu, Yang Ke, Wang Zhongqi (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (2). —131~134

A numerical simulation is conducted with respect to an in—cascade flow field of a high—pressure turbine nozzle assembly of curved vanes in the case of the presence and absence of an air cooling spray. A three—dimensional variable specific heat computation method has been employed with the cooling air source reflecting the cooling air mixing/dilution effect. The calculation results show that the cooling air spray in the curved cascades led to a change in Mach number and temperature with the blade surface and end wall obtaining an effective low—temperature protection. Under the same cooling air flow rate the temperature reduction near a pressure side appears to be more marked than at the suction side with the cooling air film playing a more effective role. The in—cascade secondary flow exercises an influence on the cooling air distribution. **Key words:** curved cascade, air cooled turbine, numerical simulation, variable specific heat

旋转机械的功率在线测试技术 = **Rotating Machinery Power Output On—line Testing Techniques** [刊, 中] /Xu Jun, Li Chunlan, Lu Wenfa (Harbin 703 Research Institute) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (1). —135~139

The difficult problem of power output on—line measurement under unfavorable conditions can be solved by utilizing state—of—the—art science and technology. Described in this paper are the basic principles, the structure and composition of a measuring and testing system and calibration techniques with key issues and system features also pinpointed. The recommended measuring and testing system has broad application prospects. **Key words:** power output, remote measurement, on—line measurement