

汽轮机循环水系统的稳态仿真数学建模

柳海峰, 史小平, 姚 郁

(哈尔滨工业大学 仿真中心, 150001)

摘 要: 汽轮机循环水系统是一个冷水与高温水蒸气的热交换系统, 其水温与水压的机理数学模型十分复杂, 不适用于计算机实时仿真系统。作者利用电厂实测数据, 通过一种超曲面拟合的方法, 建立了该系统水温与水压的仿真数学模型, 该模型计算量较小。仿真结果验证了这种拟合建模方法具有较高的精确度。

关键词: 数学建模; 仿真; 超曲面拟合

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A

1 前言

汽轮机循环水系统是一个典型的汽水网络系统, 其水流过程和热交换机理都十分复杂。在电厂培训型仿真系统中, 用软件实现系统的数学模型是必不可少的。如果用机理来建模, 则计算量较大, 甚至某些机理微分方程难以求解, 这就直接影响了仿真的实时性^[1-2]。

为了解决上述工程实际问题, 作者采用电厂实测数据, 通过一种超曲面拟合的方法, 建立了循环水系统的近似仿真数学模型, 该模型包括循环水的压力模型和温度模型, 它的计算量小, 精确度高。仿真结果验证了模型的上述特点。

2 超曲面拟合方法

根据样本数据构造系统模型, 由以下几个部分组成, 样本值集合, 距离范数, 活化函数, 权函数和输出函数。

2.1 定义

2.1.1 样本集合

令 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 为 m 维空间的样本集合, 其中样本 $X_i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i)$ 为 m 维空间一个点, N 为样本总数。

2.1.2 距离范数

$$r(X_k, X_i) = \|X_k - X_i\|_2^{\frac{1}{2}} = \left\{ \left(\frac{x_1^k - x_1^i}{\alpha_1} \right)^2 + \left(\frac{x_2^k - x_2^i}{\alpha_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_m^k - x_m^i}{\alpha_m} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中 $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为样本, X_k 是空间中的任意一点, α_i 为距离的相关度参数。

2.1.3 活化函数

$$\varphi(r) = \begin{cases} \frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} & r < R \\ 0 & r \geq R \end{cases} \quad (2)$$

$$\varphi(X_k, X_i) = \varphi[r(X_k, X_i)]$$

其中 R 为一常值, 它的意义是 m 维空间中一个截止距离。

活化函数 $\varphi(r)$ 具有如下性质:

- ① 当 $r \rightarrow 0$ 时, $\varphi(r) \rightarrow \infty$
- ② 截止性: 当 $r \geq R$ 时, $\varphi(r) = 0$
- ③ $\varphi(r)$ 单调下降且连续可微

2.1.4 权函数^[3]

$$W(X_k, X_i) = \begin{cases} \varphi(X_k, X_i) / \sum_{j=1}^n \varphi(X_k, X_j) & X_k \notin X \\ 1 & X_k \in X \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

其中 n 为有效样本数目。各经验样本的权 $W(X_k)$ 正比于其活化函数 $\varphi(X_k)$ 。

2.1.5 系统输出函数

$$y = f(x) = \sum_{i=1}^n W(X, X_i) y^i \quad (4)$$

其中, y 是输出值, y^i 是有效样本值。

2.2 多输入输出系统

在模型建立之前, 先考虑一个具有 m 维输入空间和 h 维输出空间的系统^[4]。把输入空间定义为 $X =$

(x_1, x_2, \dots, x_m) (X 为 m 维空间输入数据), 输出空间定义为 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_h)$ (Y 为 h 维空间输出数据), 输入和输出之间的关系见式(5)

$$y_i = f_i(X) \quad i = 1, 2, \dots, h \quad (5)$$

2.3 模型建立

- (1) 根据系统确定一个距离区间长度 R 。
- (2) 建立系统数学模型。

$$f_i(X) = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\varphi[r(X, X_j)]}{\sum_{l=1}^n \varphi[r(X, X_l)]} \cdot y_j \quad (i = 1, 2, \dots,$$

$h)$ (6)

3 循环水系统的仿真建模

3.1 循环水系统的结构

汽轮机的循环水系统由循环水网络部分和凝汽器部分组成, 如图 1 所示^[5]。其中, 循环水部分包括三个完全相同的循环水泵和八个阀门及一些水路、水池。凝汽器部分包括三个完全相同的凝汽器以及相应的水蒸气管路。整个系统的主要作用是使高温高压的水蒸气凝结成水, 以便于再循环。

3.2 循环水系统的现场实测数据

根据电厂的现场实测数据, 用式(6)进行建模。

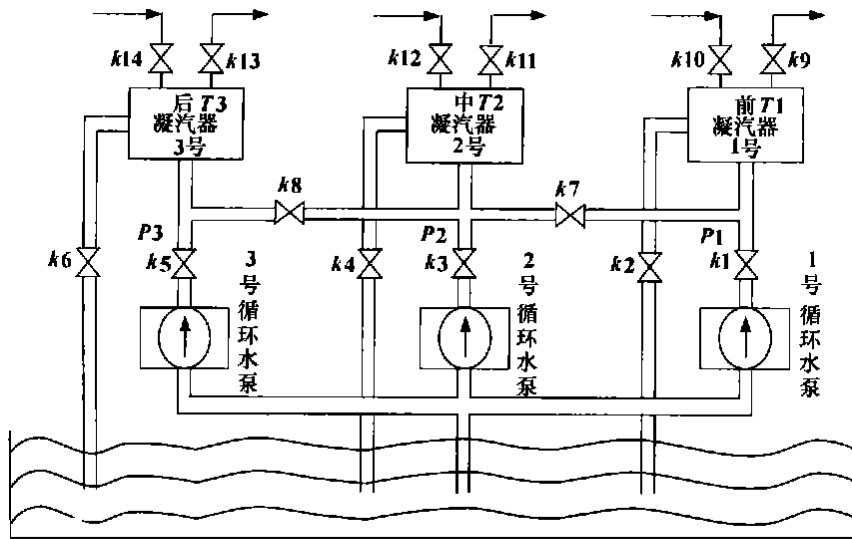


图 1 汽轮机循环水系统

3.3 循环水系统的仿真模型

将实测的输入和输出数据代入数学模型式(6)中, 其中输入 $m = 14$, 输出 $h = 6$, 样本总数 $N = 10$, R 一般取样本最大总距离数的一半, 即 $R = 5.67$, 压力与温度输出函数如下:

表 1 实测输入数据

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表 2 实测输出数据

P1	P2	P3	T1	T2	T3
0.05	0.05	0.05	500	500	500
0.1	0.1	0.1	470	470	470
0.16	0.16	0.16	460	460	460
0.2	0.2	0.2	375	375	375
0.3	0.3	0.3	300	300	300
0.24	0.24	0.24	330	330	330
0.21	0.21	0.21	360	360	360
0.15	0.15	0.15	400	400	400
0.12	0.12	0.12	420	420	420
0.11	0.11	0.11	450	450	450

$$P_i(X) = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\varphi[r(X, X_j)]}{\sum_{l=1}^n \varphi[r(X, X_l)]} \cdot y_j \quad (i = 1, 2, 3)$$

$$T_i(X) = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\varphi[r(X, X_j)]}{\sum_{l=1}^n \varphi[r(X, X_l)]} \cdot y_j \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

关于距离范数中相关度参数的选取, 可根据输入中输入数据变化情况而定。选取原则一般为: 当某一输入的改变, 对某一输出影响较大时, 将与其相对应的相关度变小, 这样就会增加其输入与输出相关性。在本文中, 根据测试数据确定的相关度参数为, $\alpha_4 = 0.15$, $\alpha_5 = \alpha_{13} = \alpha_{14} = 0.25$, 其余为 1。

4 仿真试验的结果与分析

经过模型的计算, 其结果如表 3、表 4 所示。

表3 测试输入数据

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
0.4	0.4	0.4	0.9	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.6	0.6	0.6	0.6	0.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9

表4 测试输出数据

P1	P2	P3	T1	T2	T3
0.198	0.198	0.198	367	367	367
0.196	0.196	0.196	394	394	394
0.201	0.201	0.201	385	385	385

表5 在表3测试输入下现场实际的输出数据

P1	P2	P3	T1	T2	T3
0.195	0.199	0.194	369	366	365
0.193	0.199	0.198	397	397	392
0.208	0.206	0.207	387	388	383

根据上述仿真模型的测试结果,对比表2和表4:当其它阀门的开度均为0.4,而4号阀门的开度变为0.9时,P1、P2、P3的值均有所降低,T1、T2、T3的值均有所降低;当其它阀门的开度均为0.6,而5号阀门的开度变为0.2时,P1、P2、P3的值均有所降低,T1、T2、T3的值均有所升高;当其它阀门的开度均为0.7,而13、14号阀门的开度变为0.9时,P1、P2、P3的值均有所降低,T1、T2、T3的值均有所升高。

对比表4和表5,表4中用本文方法的模型输出

结果与表5中实测结果相比,上述数据只是在有效数字的第三位有区别。经过统计计算,误差与实测值之比均小于3.5%。因此,误差精度较高。这就证明了本文方法的有效性和正确性。

4 结论

本文通过对循环水系统的建模数值仿真,证明了所提出方法的正确性和实用性。在工程实际中这种复杂系统经常会遇到,它们的机理十分复杂,而只有通过其它的方法建立数学模型,本文为这一问题提供一种方便而行之有效的办法,此方法应用前景十分广阔。

参考文献:

[1] 王行仁. 建模与仿真的回顾及展望[J]. 系统仿真学报, 1999, 11(5): 309-311.
 [2] 李伯虎, 王行仁. Modeling and Simulation in China[A]. 4th Meeting of International Simulation Advisory Group[C]. 北京: 北京航空航天大学, 1995.
 [3] 黄友谦. 曲线曲面的数值表示与逼近[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
 [4] 王德人, 杨忠华. 数值逼近引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
 [5] 哈尔滨汽轮机厂. 20万千瓦汽轮机的结构[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.

(渠 源 编辑)

(上接第405页)

(1) 涡流拱是一项能够全燃无烟煤的新技术。涡流拱可以有效地增加将后拱下高温烟气卷吸输送到前拱区的能力,给新燃料及时提供引燃所需要的热量;增大了拱区对煤层的覆盖面积,拱下回转气流延长了烟气中可燃气体和固体颗粒在炉膛的停留时间,有助于强化燃烧;拱下涡流场能够实现烟气中部分灰粒的早期分离,减少烟尘排放浓度。

(2) 模化试验表明,涡流拱可以将无序的紊流场整理成有序的涡流场,在拱下形成一对围绕垂直轴反向旋转的对称可控旋涡,卷吸后拱气流向前拱输送。随着涡流拱孔径减小,卷吸强度和流动阻力增加,负压区高度减小。试验参数内,最高卷吸回流量比传统层燃炉膛增加65.9%。

(3) 涡流拱最佳结构参数的选择应考虑卷吸强度和流动阻力的大小,以及负压区高度的影响。

SHL10-13型锅炉的实际开孔直径在800mm~1000mm为宜。

(4) 涡流拱首次运行实践表明,该项新技术能有效解决II类末煤型无烟煤的着火问题,提高燃烧效率,为我国链条炉全燃各种类型无烟煤、劣质煤提出了一条新思路。

参考文献:

[1] 杜梅芳, 张忠孝. 典型中国无烟煤燃烧特性研究[J]. 热能动力工程, 1994, 9(6): 336-340.
 [2] 董秉纲, 尹协远, 朱克勤. 涡运动理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1994.
 [3] 周光焘, 严宗毅, 许世雄, 等. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
 [4] 沈月芬, 郭志仁, 曹子栋, 等. 利用偶极子涡流器强化层燃锅炉燃烧的试验研究[J]. 动力工程, 1998, 18(2): 35-38.

(何静芳 编辑)

cillation method

边缘检测小波对信号奇异性的检测在汽液两相流动中的应用 = **The Use of Edge Detection of Wavelets for Signal Singularity Detection in a Gas-liquid Two-phase Flow** [刊, 汉] / SHANG Zhi, GUO Yu-jun, SU Guang-hui, et al (Energy and Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 421 ~ 424

Currently, function (signal) singularity detection method is mainly realized through the use of wavelet transformation. As the dissociation of wavelets is characterized by a fairly good localized feature of space and frequency domain, the wavelet transformation can delineate the variation law of signals and perform the detection and analysis of various singular properties of singular points in signals. It is also possible to analyze a gas-liquid two-phase flow condition through an edge detection of wavelet transformation and detect thermodynamic data in a gas-liquid two-phase flow. The edge detection of pressure curves of a gas-liquid two-phase uniform-phase flow model shows that the edge detection of wavelets can be fully utilized to perform the edge detection of the gas-liquid two-phase flow conditions. **Key words:** wavelet transformation, edge detection, gas-liquid two-phase flow

减振算法研究及其在轴流压缩机叶片中应用 = **A Study of Vibration Damping Algorithm and Its Application on Compressor Blades** [刊, 汉] / XUE Guo-xin, XIAO Li-chuan (Jiangsu Provincial Petrochemical Institute, Changzhou, Jiangsu Province, China, Post Code: 213016) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 425 ~ 427

The use of viscous-elastic materials has been considered as one of the effective means for coping with vibrations in major mechanical devices of power engineering units. The calculation of vibration eigenvalues, though rather complicated, is of crucial importance. In view of the possibility of a wide-range variation of damping characteristics of mechanical devices the authors have proposed a high-order perturbation model. The latter has a unified calculation scheme and can be employed to perform a reliable analysis of the eigenvalues of the relevant devices. A study of its use on compressor blades has shown that the model gives reliable results, lends itself to be easily programmed by a computer and can be readily popularized for general use. **Key words:** vibration damping, analysis of eigenvalues, perturbation method, compressor blade

汽轮机循环水系统的稳态仿真数学建模 = **Mathematical Modeling for the Simulation of the Circulating Water System of a Steam Turbine** [刊, 汉] / LIU Hai-feng, SHI Xiao-ping, YAO Yu (Simulation Center under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 428 ~ 430

The circulating water system of a steam turbine represents a heat exchange system of cooling water and high-temperature steam. The mathematical model based on the mechanism of the cooling water and water pressure is very complicated and not suited for a computer-based real-time simulation system. By the use of the measured data of a power plant and with the help of a hyper-curvature fitting method set up was a mathematical model for the simulation of the water temperature and water pressure of the circulating water system. The recommended model involves a relatively small computation load and features a high precision as certified by the simulation results. **Key words:** mathematical modeling, simulation, super-curvature fitting

一种电站热工流体系统故障诊断的方法 = **A Fault Diagnosis Method for the Thermodynamic Fluid System of a Power plant** [刊, 汉] / YAN Shui-ping, HUANG Shu-hong, GAO Wei (Power Engineering Department, Central China University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 431 ~ 433, 443

Presented is a strategy of system division designed to conduct fault diagnoses for a complicated system. With the condensate system of a power plant serving as an example described are the system simulation method and its related model. Explored is a method of fault identification and diagnosis through the use of a real-time system simulation model and failure model. The recommended method can not only make a diagnosis of the common faults (for example, pipe leakage and clogging) of the system but also solve the residuals-caused difficult problems in a complicated system. This has laid the foundation for the use of autonomous type of fault diagnosis system in power plants. **Key words:** fault diagnosis, system