

# 大型汽轮机组状态综合评价的理论及系统研究

李录平, 张晓玲, 王春梅, 卢绪祥

(长沙电力学院 动力工程系, 湖南 长沙 410077)

**摘要:** 作者研究了大型汽轮机组状态综合评价的理论, 建立起机组状态综合评价的数学模型。在此基础上, 开发出大型汽轮机组状态综合评价的软件系统。本软件系统的主要功能是实现汽轮机组的当前运行状态的实时综合评价, 为实现机组的状态检修提供决策依据。本文作者还将开发出的汽轮机组状态评价软件应用于国产 300 MW 汽轮机组的状态评价。

**关键词:** 汽轮机组; 状态评价; 数学模型; 相对劣化度

中图分类号: TK268 文献标识码: A

## 1 引言

大容量汽轮机组是一个复杂的机电系统, 具有故障率高和故障危害性大的特点。由于设计、制造、安装、维护、管理和运行等方面的原因使得许多大型汽轮机组的强迫停运率和事故发生率居高不下, 造成了严重的社会后果和很大的经济损失。因此, 为了避免出现严重的后果, 对汽轮机组进行运行状态的监测和状态综合评价就很有必要。机组状态评价的结果将为机组的状态(预测)维修、状态监测以及判断机组故障严重程度提供一个有力的依据, 指导机组的运行和维修。

## 2 汽轮机组状态综合评价的数学模型

汽轮机组在结构上具有层次性, 如图 1(a) 所示。可根据机组的层次结构来对机组实施状态综合评价。在建立起了机组状态评价的层次结构模型后, 机组的状态评价过程如图 1(b) 所示。整个机组的状态评价过程是从“部件级”开始的, 完成“部件级”评价后, 进入“子子系统级”评价; 完成所有的“子子系统级”评价后, 进入“子子系统级”评价; 完成全部的“子子系统级”评价后, 进入“机组级”状态评价。利用机组的层次结构模型可实现对机组状态的准确评

价。在对任何一个级别进行状态评价时, 都需要借助于适当的评价数学模型。下面对典型的评价模型进行论述。

### 2.1 状态评价的定量指标——相对劣化度

相对劣化度就是设备(或系统)当前实际状态与故障状态相比的相对劣化的程度。相对劣化度是一个定量指标, 取值范围为 $[0, 1]$ 。当相对劣化度为 1 时, 说明整个设备(或系统)处于故障状态, 当相对劣化度为 0 时, 设备(或系统)处于最优状态, 当相对劣化度大于 0 小于 1 时, 机组处于一定程度的劣化状态。

一个具体系统(或子系统)的评价就是选定一个评价特征指标向量  $X$ , 根据该特征指标向量  $X$  通过一定的数学模型计算出该系统的综合相对劣化度。这种数学模型建立起了从特征指标空间到状态空间的映射关系。神经网络在刻画这种映射关系时具有明显的优越性, 但收集神经网络的训练样本存在较大困难。因此, 采用式(1)的线性加权数学模型来计算一个系统(或子系统或某个设备)的相对劣化度具有模型简单、计算量小、物理意义明确的特点。

$$\mu(x) = a_1\mu_1(x_1) + a_2\mu_2(x_2) + \dots + a_n\mu_n(x_n) \quad (1)$$

0 式中:  $a_i$ —表示各特征指标所占的权重,  $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ ;  $\mu_i(x_i)$ —表示用第  $i$  个特征指标计算出的相对劣化度;  $\mu(x)$ —表示系统的综合劣化度。

根据有关领域专家的咨询意见, 表 1 给出了汽轮机组各子系统和机组相对劣化度取值范围与设备状态之间的对应关系。

### 2.2 基于振动信号和轴系运行参数的转子状态评价数学模型

#### 2.2.1 基于振动信号的转子状态评价数学模型

汽轮机组是大型高速旋转机械, 振动是汽轮机

收稿日期: 2001-11-27; 修订日期: 2002-04-12

基金项目: 湖南省教育厅青年基金资助项目(00B015); 湖南省自然科学基金资助项目(01JJY3022)

作者简介: 李录平(1963—)男, 湖南邵阳人, 长沙电力学院教授, 博士

组本体状态的非常重要的表征参数, 利用振动信号来评价机组本体的状态, 具有重要的意义。

表 1 相对劣化度的语义定义

劣化度取值范围	设备状态语义描述
0 ~ 0.2	设备状态良好, 可以继续运行
0.2 ~ 0.4	设备偏离正常状态, 应该加强各项运行指标的监测
0.4 ~ 0.7	设备状态严重劣化, 运行参数已超出了允许范围, 若无法及时找到故障, 就应该作好停机的准备
0.7 ~ 1.0	设备状态已由劣化状态转化到了故障状态, 应立即停机进行检查和维修, 以防止故障危害的进一步扩大

振动信号经过采样、离散化以后得到其幅值谱序列为 $\{A_j\}$ , 归一化处理以后为 $\{S(j)\}$ 。对于机组轴系而言, 振动的测点有多个, 设测点总数  $m$  个。用  $k(k = 1, 2, \dots, m)$  表示某一特定测点, 离散化以后其幅值谱序列为 $\{A_{kj}\}$ , 幅值谱序列归一化处理以后为 $\{S_k(j)\}$ 。

(1) 对于第  $k$  个信号测点, 幅值域内相对劣化度的值定义为:

$$D_A(k) = [A(k) - A^0] / (A^{\max} - A^0) \quad (2)$$

式中:  $A^{\max}$ — 振幅的停机阈值;  $A^0$ — 振幅为正常值时的阈值;  $A(k)$ — 第  $k$  个测点通频振幅的实际值。

对于具有  $m$  个测点的轴系而言, 幅值域内相对劣化度的值定义为:

$$D_A = \sum_{k=1}^m \varphi(k) D_A(k) \quad (3)$$

式中:  $\varphi(k)$ — 不同测点所占的权重,  $0 \leq \varphi(k) \leq 1$ ,  $\sum \varphi(k) = 1$ 。

(2) 对于第  $k$  个信号测点, 频域相对劣化度的值定义为:

$$D_F(k) = - \sum_{j=1}^N \omega(j) [S_k(j) \log S_k(j)] / \log N \quad (4)$$

式中:  $N$ — 谱线数目;  $\omega(j)$ — 离散谱各种频率成分的影响因子。

式(4)是借用信息熵的计算方法来计算振动信号频域劣化度的。从理论上讲, 当机组的状态正常时, 振动信号以旋转频率  $f_r$  为主, 此时  $D_F(k) = 0$ 。当状态异常时, 将出现高频分量和低频分量, 此时  $0 < D_F(k) < 1$ 。当信号为白噪声时, 频谱最复杂, 此时  $D_F(k) = 1$ 。 $\omega(j)$  就是用来描述不同的频率成分对机组本体状态的影响。若将各频率成分对机组本体状态产生的效应视为相同, 则  $\omega(j) \equiv 1$ 。

对于  $m$  个测点而言, 有:

$$D_F = \sum_{k=1}^m \varphi(k) D_F(k) \quad (5)$$

式中,  $\varphi(k)$ — 各个测点所占的权重,  $0 \leq \varphi(k) \leq 1$ ,  $\sum \varphi(k) = 1$ 。

(3) 利用振动信号计算出的综合劣化度为:

$$D = (D_F + D_A) / 2 \quad (6)$$

### 2.2.2 基于轴系运行参数的状态评价数学模型

所选取的主要运行参数有: 推力轴承金属测度、推力轴承回油温度、径向轴承的金属温度和回油温度、高压缸汽缸上下壁温差、转子胀差、轴向位移、润滑油油箱油位、润滑油压。对于这些参数主要是利用各指标的实际值、正常值上下限、停机阈值上下限进行判定求出其相对劣化度。例如, 利用轴承的回油温度计算轴承相对劣化度的方法为:

$$D = \mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a_0 \\ |(x - a_1) / (a_0 - a_1)| & a_0 < x < a_1 \\ 0 & a_1 < x < a_2 \\ |(x - a_2) / (a_3 - a_2)| & a_2 < x < a_3 \\ 1 & x > a_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $a_1, a_2$  为回油温度正常值的下限和上限,  $a_0, a_3$  为回油温度停机值下限和上限。

### 2.3 基于热经济性指标的汽轮机组通流部分状态评价数学模型

汽轮机组通流部分状态的优劣可用其热经济性指标偏离正常值的程度来描述。用于刻画通流部分状态的热经济指标可以是热耗率、汽耗率、汽轮机各缸热效率、汽轮机各缸膨胀线夹角等, 可任选其中的一个热经济指标用于描述通流部分的状态。若选择各汽缸相对内效率作为评价特征参数, 则某一个汽缸通流部分在某一工况下的相对劣化度为:

$$D = (\eta_{ri} - \eta_{ri}^{\min}) / (\eta_{ri}^0 - \eta_{ri}^{\min}) \quad (8)$$

式中:  $\eta_{ri}^{\min}$ — 汽缸相对内效率停机检修阈值;  $\eta_{ri}^0$ — 汽缸在某一工况下相对内效率的正常值;  $\eta_{ri}$ — 汽缸相对内效率的实际值。

在利用各种热经济指标来评价汽轮机通流部分的状态时, 首先要确定各个热经济指标在任意工况下的正常值, 即要确定状态评价的基准状态。由于基准状态一般随负荷、主蒸汽参数及排汽参数变化, 因此需要建立热经济指标基准值与机组负荷、主蒸汽参数和排汽参数的关系。如汽缸的相对内效率基准值可表示为:

$$\eta_{ri}^0 = f(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{i=0}^{n_1} a_i x_1^i + \sum_{i=0}^{n_2} b_i x_2^i + \sum_{i=0}^{n_3} c_i x_3^i + \sum_{i=0}^{n_4} d_i x_4^i \quad (9)$$

式中: 自变量  $x_1, x_2, x_3, x_4$  为实际主蒸汽流量、主蒸汽温度、主蒸汽压力和排汽压力与相应参数的设计值之比。当机组的进汽参数和排汽参数基本保持不

变时,  $\eta_{ii}^0 = f(x_1) = \sum_{i=0}^{n_1} a_i x_1^i$ 。上式可利用机组的理论计算数据或机组热力试验数据拟合得到。

### 2.4 汽轮机组状态综合评价数学模型

由于汽轮机组具有如图 1 所示的层次结构, 整个机组的状态综合评价指标  $D_{unit}$  (劣化度) 可用下式计算:

$$D_{unit} = \sum_{k=1}^m \varphi_{sub}(k) D_{sub}(k) \quad (10)$$

式中,  $\varphi_{sub}(k)$ —各子系统所占的权重,  $0 \leq \varphi_{sub}(k) \leq 1$ ,  $\sum \varphi_{sub}(k) = 1$ ;  $D_{sub}(k)$ —各子系统的相对劣化度,  $0 \leq D_{sub}(k) \leq 1$ 。

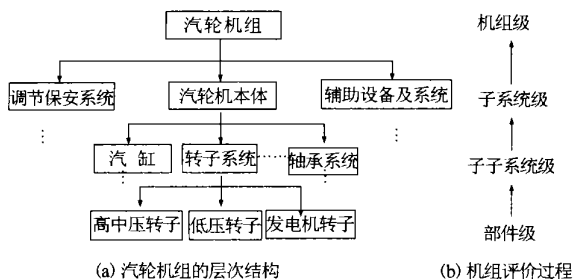


图 1 汽轮机组的层次结构及评价过程示意图

## 3 国产 300 MW 汽轮机组状态评价系统研究与应用

### 3.1 300 MW 汽轮机组状态综合评价系统结构

在 Windows 98 环境下利用 Visual Basic 6.0 可视化软件开发平台开发出了国产 300 MW 汽轮机组状态评价系统。该系统的结构如图 2 所示。

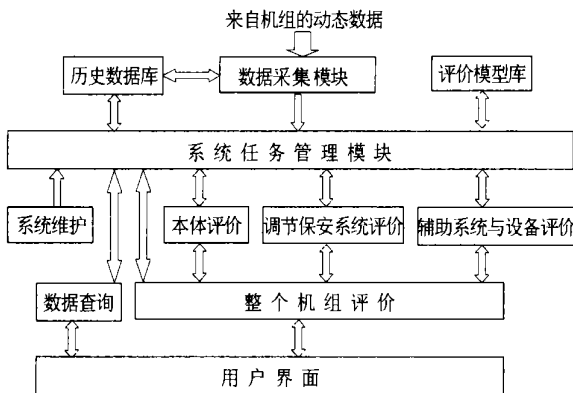


图 2 机组状态评价系统的总体结构

该系统的主要功能: 动态数据采集、数据查询、状态评价, 系统维护以及系统任务管理。整个状态

评价系统的工作过程是由任务管理模块进行管理的。当外界请求对机组(或某一个子系统)进行状态评价时, 先由数据采集模块采集机组的动态数据, 再从历史数据库中调用机组的历史数据, 从评价模型库中调用相应的评价模型, 启动状态评价模块进行评价, 再将评价结果由用户界面输出, 并将评价结果存入历史数据库。在采集完动态数据和从历史数据库调入数据后, 机组状态的状态评价过程是分层从设备级向上逐层进行的(如图 1(b))。

所研制的 300 MW 汽轮机组的状态综合评价系统, 既可对机组的某一个子系统(或设备)单独进行状态评价, 也可以对整个机组进行状态综合评价。

### 3.2 300 MW 汽轮机组状态综合评价系统应用

利用所研制的状态评价系统对国产 N300—16.7/540/540 型汽轮机组的某一实际状态进行评价(因篇幅有限, 机组的设计参数和运行数据未列出), 评价结果见表 2。从表 2 可以看出, 由于采用了层次结构的评价模型, 可以掌握机组各子系统(甚至单个设备)的状态劣化情况, 以及造成子系统状态劣化的原因。同时, 还可以掌握整个机组的状态劣化情况, 分析出导致机组综合状态劣化的主要原因, 以便采取相应的对策措施。

表 2 国产 N300—16.7/540/540 型汽轮机组某一状态综合评价数据

系统级别	系统名称	相对劣化度	造成系统状态劣化的主要原因
子系统级	汽轮机本体	0.24	轴系统振动偏大, 频谱复杂; 轴承金属温度和回油温度偏高; 发电煤耗高于正常值
	辅助设备 及系统	0.28	1号高加有泄漏; 凝汽器真空偏低
	调节与 保安系统	0.16	基本正常
机组级	汽轮机组	0.23	轴系振动异常; 凝汽器真空偏低; 高加有泄漏

### 参考文献:

[1] 李庚. 火力发电厂安全性评价[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[2] 忻建华, 叶春, 陈汉平, 等. 300 MW 汽轮机高压缸通流部分故障的热参数模糊诊断[J]. 动力工程, 1997, 17(3): 5—8.

[3] 戈云华, 宋之平, 李如翔, 等. 基于热参数的汽轮发电机组多故障诊断模型[J]. 热能动力工程, 2000, 15(4): 420—422.

[4] 王爱军, 张小桃, 王培红, 等. 回热系统运行能损在线数学模型研究[J]. 汽轮机技术, 2001, 43(1): 38—40.

[5] KOHONEN T. The self-organizing map[J]. Proceedings of IEEE, 1990, 78(9): 1464—1481.

(渠源 编辑)

发展超临界循环流化床的讨论 = **A Discussion Concerning the Development of Supercritical Circulating Fluidized Beds** [刊, 汉] / XIN Jian, LU Jun-fu, YUE Guang-xi (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), YU Long (Harbin Boiler Works Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 439 ~ 441

Summed up are some issues demanding due attention at the working medium side during the design of a supercritical circulating fluidized bed. Also presented are the steam-water characteristics under a supercritical pressure and the specific features of a supercritical fluidized bed as well as the flow characteristics of the working media in water walls and the type selection of the latter. **Key words:** supercritical, circulating fluidized bed, water wall

大型汽轮机状态综合评价的理论与系统研究 = **Theoretical and Systematic Study of the Comprehensive Evaluation of the Operating State of a Large-sized Steam Turbine Unit** [刊, 汉] / LI Lu-ping, ZHANG Xiao-ling, WANG Chun-mei, et al (Changsha University of Electric Power, Changsha, China, Post Code: 410077) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 442 ~ 444

The theory concerning the comprehensive evaluation of the operating state of a large-sized steam turbine unit is studied followed by the establishment of a mathematical model for that evaluation. On this basis a software system for the above evaluation has been developed. The main function of the software system consists in realizing a real-time comprehensive evaluation of the current operating condition of a steam turbine unit, thereby providing a basis for a decision-making concerning the condition maintenance/repair of the steam turbine unit. The above-mentioned software has also been employed for evaluating the operating state of a Chinese-made 300MW steam turbine unit. **Key words:** steam turbine unit, operating state evaluation, mathematical model, relative inferiority degree

船用汽轮机末级叶片抗蚀技术试验研究 = **Experimental Study of Erosion Resistance Techniques for the Last-stage Blades of a Marine Steam Turbine** [刊, 汉] / LI Dian-xi, FAN Yi, LUO Chun-xin, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 445 ~ 446

Through hot-state erosion tests using four kinds of erosion resistance method a surface erosion-resistance technique with highly promising prospects has been identified, which conforms to the specific requirements of the last-stage blades of a marine steam turbine. This has laid a solid basis for the further engineering research of various erosion-resistance techniques. **Key words:** blade erosion resistance, laser quenching under phase transformation conditions

循环灰为热载体的移动床煤热解室数学模型 = **Mathematical Model of a Moving-bed Coal Pyrolysis Chamber with Cycling ash Serving as a Heat Carrier** [刊, 汉] / LIU Qing-hui, LU Zi-an, LI Ding-kai (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 447 ~ 450

A moving-bed coal pyrolysis chamber with cycling ash serving as a heat carrier represents a key equipment item in a coal gas - steam cogeneration system. On the basis of the following factors set up is an integrated mathematical model for a moving-bed coal pyrolysis chamber. The factors include: a sub-model based on coal drying and pyrolysis, the theory of flow and heat transfer in non-sintered porous media as well as the theory of contact heat conduction between solids and the criteria of "restricted particle diameter". With the help of the above-cited model a simulation calculation was conducted of the pyrolysis process of Longkou lignite and satisfactory results were obtained. **Key words:** coal, pyrolysis, moving bed, mathematical model