

国产 200 MW 汽轮机转子在线热应力监测与寿命管理

李爱军¹, 谢诞梅¹, 杨俊¹, 王建梅¹, 刘先斐¹, 黄树红², 申

(1. 武汉水利电力大学 动力系, 湖北 武汉 430074; 2. 华中理工大学 动力系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 使用面向对象的语言, 开发了国产 200 MW 汽轮机转子的在线热应力监测与寿命管理软件, 该软件具有热应力监测、异常数据查询、启停指导和启停追忆等功能。

关键词: 汽轮机; 转子; 热应力; 寿命

中图分类号: TK263.6⁺1; TP311.132.4 文献标识码: A

1 引言

随着我国电网容量的增大, 已经采用国产 200 MW 机组参与调峰运行, 由于机组启动频繁, 其主要部件要经常承受剧烈的温度变化, 从而产生交变热应力, 这种交变热应力将导致部件产生低周疲劳寿命损耗, 其中汽轮机转子的工作条件最为恶劣; 另外, 汽轮机转子长期在高温区工作, 还会产生高温蠕变疲劳损耗, 这两种损耗迭加在一起, 将缩短汽轮机转子的使用寿命。

本文开发的汽轮机转子的在线热应力监测和寿命管理软件, 主要是采用转子热应力、疲劳寿命损耗理论, 通过对热应力和疲劳寿命的在线实时计算, 控制蒸汽和金属温升率, 限制部件的热应力, 保证循环寿命消耗量不超过规定的数值, 并以此作为汽轮机启停控制的基本准则。随着现代管理和科学技术的发展, 人们越来越认识到研究、开发并完善汽轮机转子寿命的在线监测与管理软件是非常必要的。

本文从热应力、寿命计算的数学模型出发, 介绍运用面向对象的语言开发的国产 200 MW 汽轮机转子的在线热应力监测与寿命管理软件的构成、使用效果和应用前景。

2 寿命计算的数学模型

改型设计的国产 200 MW 汽轮机, 在转子结构中取消了弹性槽, 加大了叶轮根部的过渡圆角。经过分析比较, 高压调节级和中压第一级叶轮根部的

热应力集中系数最大, 所以本文把高压转子调节级后的叶轮根部作为一个危险点来监测。在本文研制的汽轮机转子实时热应力监测和寿命管理软件中, 采用了下述的数学模型。

2.1 温度场的计算

计算汽轮机转子不稳定温度场时, 可以认为转子是一个均匀、各向同性且无内热源的物体, 在现场进行汽轮机转子的寿命管理时, 要求热应力和寿命损耗计算简单、快速、基本正确可靠。一般认为温度场问题的一维解法适用于寿命管理。在考虑到转子局部结构的边界条件时, 汽轮机转子的温度场计算根据下述一维不稳定导热方程和初始边界条件进行。

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + 2 \frac{1}{X} \frac{\partial T}{\partial X} \right] \\ T|_{\tau=0} = T_0 \\ k \frac{\partial T}{\partial X} |_{X=R_b} = 0 \\ k \frac{\partial T}{\partial X} |_{X=R_0} = h(T_f - T) \end{cases} \quad (1)$$

式中: T —转子任意一点的温度, $^{\circ}\text{C}$; X —转子径向任意一点半径, m ; τ —时间, s ; T_0 —转子初始温度, $^{\circ}\text{C}$; T_f —蒸汽温度, $^{\circ}\text{C}$; R_0 —转子外表面半径, m ; R_b —转子中心孔半径, m ; k —转子材料导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$; h —蒸汽对转子放热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$; α —转子材料导温率, $\text{m}^2/^{\circ}\text{C}$;

2.2 应力计算

2.2.1 热应力计算

$$\sigma_H = \frac{E\beta}{1-\gamma} (T_0 - T) \quad (2)$$

其中 $T_0 = \frac{2}{r-r_0} \int_{r_0}^r Tr dr$ 为体积平均温度, K ; T —外表面或中心孔温度, K ; γ —泊松比; E —弹性模量, MPa ; β —线胀系数;

2.2.2 离心应力的计算

$$\sigma_n = \sigma_0 \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 \quad (3)$$

式中 σ_n 为任意转速下的离心切向应力, MPa;

σ_0 为额定转速下 n_0 的切向离心应力, MPa;

2.2.3 转子的合成应力

根据第一强度定理可以得到:

$$\sigma_{eq} = \sigma_n + \sigma_{th} \quad (4)$$

式中 σ_{eq} — 转子中心孔或外表面处的合成应力, MPa; 考虑热应力集中系数 k_{th} , 转子的最大应力值 $\sigma_{max} = k_{th} \sigma_{eq}$, MPa;

本文所提到的应力裕度 K 定义为:

$$K = \frac{[\sigma] - \sigma_{max}}{[\sigma]} \quad (5)$$

式中 $[\sigma]$ — 许用应力值; σ_{max} — 转子外表面最大应力值。

2.3 寿命损耗计算

2.3.1 载荷谱

本系统在整理载荷谱时用的是 Timo 提出的方法: 把启动、停机、负荷变化分别视为完整的热循环来处理, 计算出全应变或相应的特征应力后, 从疲劳曲线上查出寿命损耗, 然后取其二分之一作为启动一次或停机一次或负荷变动一次的寿命损耗。

2.3.2 寿命损耗曲线和低周疲劳寿命损耗的计算

低周疲劳寿命损耗是根据西安热工所公布的 30Cr2MoV 钢低周疲劳特性曲线计算的, 本系统采用特征应力 S , 通过低周疲劳曲线确定转子的寿命损耗。

2.3.3 高温蠕变寿命损耗

高温蠕变寿命损耗通过在程序中设立转子在不同温度区域运行的时间累积值来计算。

2.3.4 总寿命损耗

根据 Miner 公式, 假设寿命损耗由低周疲劳寿命损耗和高温蠕变寿命损耗两部分线性累加构成, 计算公式如下:

$$E = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{n_i}{N_i} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\Delta t_j}{t_{Bj}} \quad (6)$$

式中 n_i 表示在循环应力作用下的实际循环周次; N_i 表示在循环应力作用下, 材料失效循环周次; Δt_j 表示在 j 温度条件下, 实际运行时间; t_{Bj} 表示在 j 温度条件下, 材料蠕变失效时间。

本文作者认为当寿命损耗累积达到 1 时, 就有

可能出现裂纹。

3 软件的构成及特点

3.1 面向对象的编程特点

该汽轮机转子的热应力监测和寿命管理系统采用的语言是面向对象的 Borland C++Object Windows 语言。

利用面向对象的语言的特点在 Windows 下设计汽轮机转子的寿命管理系统, 可以给程序设计带来很多的益处。比如说: 运用类的封装性可以使寿命计算中很少用到全局变量, 可以减少内存的占用并且使得程序易于维护; 设计 Windows 界面时, 最基本的行为是初始化和删除, 这些行为正好可以运用类的构造函数和析构函数很方便地实现; 随着疲劳学科的发展, 寿命计算方法将不断改进, 因为面向对象的语言具有良好的继承性, 本系统可以较方便地进行修改。

3.2 软件构成

图 1 是本系统的软件构成框图。

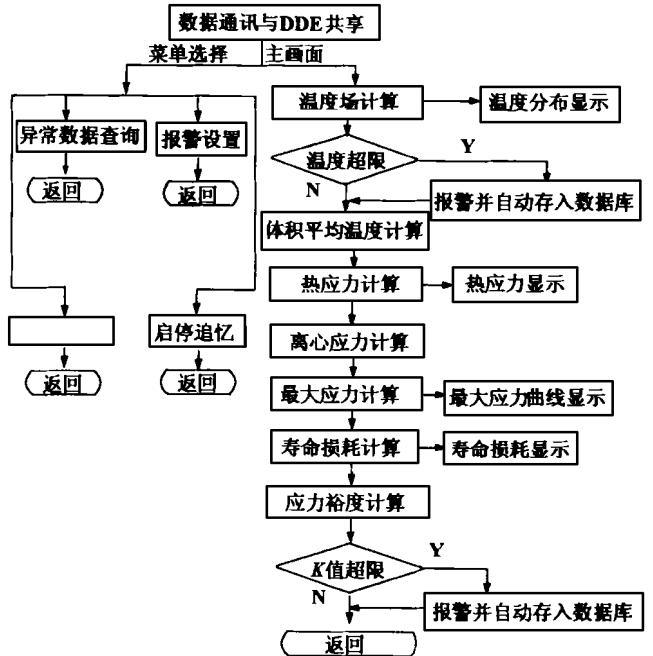


图 1 软件构成框图

软件采用分层式树状结构, 分为菜单选择和主画面两大部分, 其中主画面实现对温度、应力和寿命的实时监测, 菜单选择包括报警设置、异常数据查询、启停指导和启停追忆等功能, 菜单选择中的功能用户可以根据需要进行选用, 而不一定每一时刻都

要用到,主画面则必须每一时刻都要进行实时计算和显示,用户不能自行退出。该软件用面向对象的语言编写,采用动态数据交换的方式从服务器取得数据,这样的处理使得软件的条理清晰、易于维护和补充功能。软件界面采用下拉式菜单和弹出式窗口,全汉化界面,使用方便。软件的各个功能块采用图形方式显示,形象直观,一目了然。

3.3 软件特点

本系统主要特点如下:

(1) 本系统采用中文 Windows 多任务环境,画面丰富、操作简单,所有的实时监测画面都可以任意放大、缩小;

(2) 把所有的寿命监测计算数据、棒图、谱图的显示放在同一个窗口中,便于观察比较,使操作更简单;

(3) 所有的实时画面都具有打印的功能;

(4) 所有的功能都能在菜单里得到体现,使初用本系统的人员对本系统的功能和使用方法能够一目了然;

(5) 一般的寿命监测系统没有蠕变疲劳寿命损耗的计算,而本系统可以同时算出低周疲劳寿命损耗和蠕变疲劳寿命损耗;

(6) 应力监测主画面、启停指导曲线以及启停追忆曲线为逐步改变以每分钟升速率和升负荷率为准则的启停方式提供了工具;

(7) 在原则上用户不能退出该系统,如果不人为地关机,该监测系统的主画面就可以连续循环地采样、计算、显示,而其它功能如报警设置、异常数据查询、启停指导、启停追忆用户则可以根据需要来打开和关闭。

(8) 具有转子外表面的温度和应力的异常数据库,能够很方便地查询到最近四十五次的温度和应力报警记录;

(9) 只要选择了报警提示菜单,如果主画面出现了报警数据,主画面就会立即从层叠的窗口中弹出来,这样就可以使现场的运行和管理人员很方便地观察到报警数据,从而及时地采取相应的措施。

(10) 把标准启动曲线和启停实测曲线用同一坐标系画在同一幅图中,可以直观地看出启动的优劣。

(11) 具有启停追忆功能,能把上一次启停的实测数据和应力谱图调出来,为现场的科学管理和改进启停手段提供了方法和手段。

4 应用前景

该系统投入运行后可达到以下效果:

4.1 加强启停和变负荷过程中的汽轮机转子的寿命管理

该系统可对与汽轮机转子寿命有关的运行参数进行实时监测,进行启停中的跟踪指导,可对上一次启停参数和应力谱进行追忆,所有的实时数据和参数都可打印。这些措施提高了运行人员的操作水平,减少了汽轮机转子的疲劳寿命损耗,加强了汽轮机转子在服役期内的安全性。

4.2 加强汽轮机转子的蠕变寿命管理

该系统能对转子外表面超温情况进行实时监测,并可查询并打印最近 45 次的超温起始时间、终止时间和最高温度,消除了传统超温管理的弊端。

4.3 为检修提供指导,为事故分析提供参考资料

该系统能对汽轮机转子的疲劳寿命损耗、蠕变寿命损耗和总寿命损耗进行实时在线计算,汽轮机转子的异常数据库可供事故发生时分析参考。

4.4 节约能源

该系统通过启停跟踪指导和启停追忆,缩短了启停时间,达到了节约能源的目的。

4.5 强化班组间考核

该系统通过温度和应力超限记录报表,可判断各班组的操作水平,强化班组间的考核。

根据本寿命管理系统在现场安装和使用的效果,作者认为该系统可以在所有相同机型的国产 200 MW 汽轮机上安装使用;另外,只要改变其计算所用到的参数,该系统可以在其它机型的汽轮机上安装使用。

参考文献:

- [1] 张保衡. 大容量火电机组调峰运行的寿命管理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1998.
- [2] 胡先约. 汽轮机寿命管理与调峰运行中的若干问题[J]. 动力工程, 1985, 6(1): 1-3.
- [3] 裴世英. 汽轮机转子寿命的监测与管理[J]. 热力发电, 1995, (1): 9-16.
- [4] 杨寿敏. 汽轮机转子热应力的简易计算[J]. 热力发电, 1987, (5): 57-63.

(复 编辑)

so played a beneficial role in devising a method for the modeling of combustors with a complicated shape. **Key words:** single-tube return-flow combustor, numerical simulation, turbulent flow

舰船锅炉炉膛热力计算方法的修正 = **Revision of the Thermodynamic Calculation Method for a Naval Boiler Furnace** [刊, 汉] / Li Zhi-tao, Zhang Yu-hui, Chen Bing, *et al* (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 83 ~ 85

With regard to the specific features of a naval boiler furnace the authors have analyzed and compared the calculation results obtained when using various methods set forth in "the United Standards of 1973" etc. In the present paper recommended is a revision method adapted for the thermodynamic calculation of boiler furnace off-design conditions. **Key words:** naval boiler, thermodynamic calculation, furnace heat transfer

国产 200 MW 汽轮机转子在线热应力监测与寿命管理 = **On-line Monitoring of Rotor Thermal Stresses and Service Life Management for a Chinese-made 200 MW Steam Turbine** [刊, 汉] / Li Ai-jun, Xie Dan-mei, Yang Jun, Wang Jian-mei, Liu Xian-fei (Power Engineering Department, Wuhan University of Water Resources and Electrical Power, Wuhan, China, Post Code: 430072), Huang Shu-hong, Shen Tao (Power Engineering Department, Central China National University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 86 ~ 88

Through the use of an object-oriented language the authors have developed a software designed for the on-line monitoring of rotor stresses and service life management for a Chinese-made 200 MW steam turbine. In addition to thermal stress monitoring the software is also capable of abnormal data inquiry, offering guidance for start-up and shutdown operations as well as their recollection, etc. **Key words:** steam turbine, rotor, thermal stress, service life

能源消费与国民经济发展的灰色关联分析 = **Grey Correlation Analysis of Energy Consumption and National Economy Development** [刊, 汉] / Huang Fei (Wuxi Division under the Harbin Institute of Technology, Wuxi, China, Post Code: 214151) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 89 ~ 90

Grey correlation analysis is a kind of systemic analytical method. Through the use of this analysis it is possible to identify the major factors which influence the evolution and variation of key variables. Analyzed in this paper is the grey correlation of energy consumption and national economy development. The results obtained therein may serve as reference data for relevant administrative departments and sectors. **Key words:** grey correlation analysis, energy consumption, national economy development

亚临界炉锅水 pH 降低原因分析及预防对策 = **An Analysis of the Causes of Boiler Water pH Value Reduction in a Subcritical Pressure Boiler and Some Measures Taken for Its Prevention** [刊, 汉] / Yang Zhong-hao (North China Institute of Water Resources and Hydroelectric Power Engineering, Zhengzhou, China, Post Code: 450045) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 91 ~ 92, 100

In connection with a series of boiler water quality failures occurring at a certain power plant an analysis was conducted of the cause of the decrease in boiler water pH value. As a result, it is ascertained that the above-cited decrease has been caused by the leakage of mixed bed resin into the main system. The use of a water distribution device equipped with stainless steel trapezoid-shaped wound wires and a negative-pressure reverse-rinsing resin catcher has led to the prevention of the above-mentioned failure. **Key words:** thermal power plant, operation, accident analysis, feedwater, boiler water pH value

新型的烟气分析设备及其应用 = **A New Type of Flue-gas Analyzing Device and Its Applications** [刊, 汉] / Wang Tie-cheng, Liu Min, Xun Bai-qiu, *et al* (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 101 ~ 104