

热应力检测中的温升计算

哈尔滨工业大学 张嘉钟* * 夏松波 张 莹

【摘要】 为了消除样本周期对实时计算的局限, 采用了样本区间步进的方式, 确保样本间隔最短(一个采样本间)。新样本将包含前一样本的部分数据, 并采用线性回归平滑数据克服非线性影响, 提高数据滤波效果。计算温升率的回归递推公式提高了数据平滑和温升率计算的实时性。数值模拟结果表明该递推公式具有良好的滤波效果和收敛性。

主题词: 温度起伏 热应力 回归分析

分类号: TP277

1 前 言

热应力是影响涡轮机转子寿命损失, 导致转子疲劳破坏的主要因素^[1]。在后停机及变负荷过程中, 控制热应力的变化将会减少涡轮机转子寿命损耗^[2], 提高生产的安全可靠性。然而温度场的分析是热应力分析的基础, 温度采样值的波动是难以避免的, 该误差对温度的显示并不会产生严重的后果, 通过多次平均可减少其影响。然而该误差对热应力的计算则会造成巨大的影响, 温升率会产生正负的循环变化, 从而导致热应力计算的错误^[3], 而实际转子由于其具有较大的热容量, 温度在短时间内的跳动是不真实的, 因此必须消除采样数值的扰动。

2 温升的回归分析及回归的递推算法

采用何种方法既可消除温升的扰动, 同时又可满足计算的实时性是问题的关键。为了说明这个问题不妨采用温升曲线的数值模拟来分析, 假如转子的实际温升曲线如图 1 中曲线 1 所描述, 采样的温度样本曲线如图 2 中曲线 1 所示, 采样的离散度可以是测量误差, 或随机干扰等因素造成的, 采样值将呈现绕期望值离散分布的状态。若不排除这种影响, 计算温升后得到的温升率值会有急剧的变化。实际上在温升率的计算中参与计算的应该是温度的期望值, 这样才能真实的反映转子热应力的变化。根据回归理论, 回归分析可以解决如何确定采样点对应的期望值问题。因此, 温升的计算应该采用回归分析的方法^[4], 确定温度采样值对应的实际温升。

2.1 线性回归

温升的变化一般是缓慢的和非线性的, 采用非线性回归是比较理想的, 但是由于非线性回归的系数计算繁杂, 占用计算机机时较多, 不利于实时分析, 故采用分段区间线性回归的方法^[1], 这样做可以有效的减少计算量, 且满足回归的精度要求。将时域划分为若干子域, 每个子域既是样本时间, 在有限的样本时间段内, 温升可作线性化处理, 利用温升的回归值计算温升率。采用分段处理后, 计算精度与温升曲线的非线性程度无关, 仅与子域的线性精度有关。

线性回归方程为

$$y = a_y + (\rho\sigma_y/\sigma_x)(x - a_x) \quad (1)$$

温升率为

$$\partial y / \partial x = \rho\sigma_y/\sigma_x \quad (2)$$

其中

$$\sigma_x = \sqrt{M(y - a_x)^2}, \quad \sigma_y = \sqrt{M(y - a_y)^2}, \quad \rho = \frac{\text{cov}(y, x)}{\sigma_y \sigma_x} = M \left[\frac{x - a_x}{\sigma_x} \right] \left[\frac{y - a_y}{\sigma_y} \right]$$

式中: a_x 为 x 的数学期望, a_y 为 y 的数学期望, σ_x 为 x 的方差, σ_y 为 y 的方差, ρ 为相关系数, cov 为相关算子。显然有限段长度的选取与回归的精度密切相关, 非线性越强, 样本长度应越短, 因此应合理选择长度。在已知理论温升曲线的条件下, 选择最佳长度是没有困难的, 但在未知条件下选择样本时间长度时, 则应充分考虑转子的热容量, 热传导系数等的影响。

2.2 回归的递推计算

为了对整个温升过程作回归分析, 需将时域划分为若干子域, 在每个子域内作线性回归, 显然, 回归的效果依赖于子域的划分及子域内的采样点数。若子域太长采用线性回归将产生较大的误差, 且不利于实时性, 若子域内的采样点数太少, 将导致回归的效果不好, 难以保证回归计算的准确性, 又由于温升率的计算要求具有实时性, 常规的做法将难以满足要求, 为解决上述问题, 采用线性回归的有限时间段在时间轴上每采样一次便向前滑动一次的方式, 这样即可保证采样样本间隔最短(一个采样间隔), 提高了计算的实时性, 又可以保证采样样本具有足够的采样点数和回归计算的准确性。

由于每向前滑动一次都要重新计算回归的系数, 显然原有的系数表达形式难以满足实时计算的要求, 为此本文采用适合于实时计算的递推计算形式。设第 i 次 x 的采样值表示为 $x(i)$, 第 i 次采样求得的样本期望值 $a_x(i)$ 表示为

$$a_x(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=i-n+1}^i x_j \quad (3)$$

第 $i+1$ 次采样求得的期望值 $a_x(i+1)$ 表示为:

$$a_x(i+1) = a_x(i) + (1/n)(x_{i+1} - x_{i-n+1}) \quad (4)$$

其中 n 为样本长度, 同理 $a_y(i+1)$ 表示为:

$$a_y(i+1) = a_y(i) + (1/n)(y_{i+1} - y_{i-n+1}) \quad (5)$$

方差 σ 的递推公式为:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2(i+1) &= \sigma_x^2(i) - (2/n)a_x(i)(x_{i+1} - x_{i-n+1}) + (1/n)(x_{i+1}^2 - x_{i-n+1}^2) \\ &\quad - (1/n^2)(x_{i+1} - x_{i-n+1})^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sigma_y^2(i+1) &= \sigma_y^2(i) - (2/n)a_y(i)(y_{i+1} - y_{i-n+1}) + (1/n)(y_{i+1}^2 - y_{i-n+1}^2) \\ &\quad - (1/n^2)(y_{i+1} - y_{i-n+1})^2 \end{aligned} \quad (7)$$

相关系数 ρ 的递推公式为:

$$\begin{aligned} \rho(i+1) &= \rho(i) \frac{\sigma_x(i)\sigma_y(i)}{\sigma_x(i+1)\sigma_y(i+1)} + \frac{\delta a_x \delta a_y}{\sigma_x(i+1)\sigma_y(i+1)} \\ &\quad + \frac{1}{n} \frac{x_{i+1}y_{i+1} - x_{i-n}y_{i-n} - a_x(i+1)(y_{i+1} - y_{i-n}) - a_y(i+1)(x_{i+1} - x_{i-n})}{\sigma_x(i+1)\sigma_y(i+1)} \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\delta a_x = a_x(i+1) - a_x(i), \quad \delta a_y = a_y(i+1) - a_y(i)$$

3 模拟计算

为验证递推公式的准确性,可假设温升曲线的函数为 $a_0 + a_1 \log(t+1)$ (单位: $^{\circ}\text{C}$), a_1 和 a_0 为系数, t 为时间 (单位: min)。图 1 中的曲线 1 为该函数生成的光滑温升曲线, 图 1 中的曲线 2 是针对光滑曲线所作的回归, 样本长度为 16。

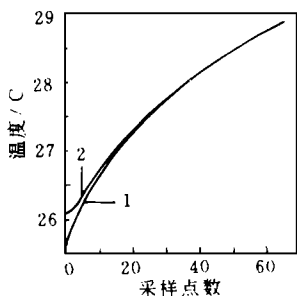


图 1 递推曲线与光滑母线比较

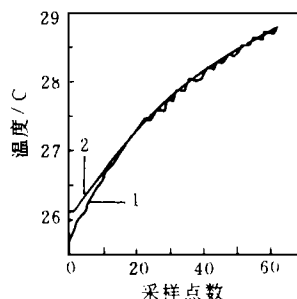


图 2 递推曲线与波动母线比较

由图 1 中可以看出, 由于受第一个样本数据的影响, 回归曲线的初始几点与被回归的曲线对应点之间较大的差别, 随回归点数的增加差别减少, 回归曲线逐渐收敛于实际曲线, 这表明递推算法具有良好的精度。图 2 是针对波动曲线所作的回归, 在假设温升曲线函数的基础上, 利用随机函数使采样值产生随机的扰动, 来模拟真实的采样曲线, 曲线 1 是模拟的采样曲线, 曲线 2 为模拟的采样曲线的回归曲线, 其样本长度为 16, 其均方差小于 20%。从图中可以看出, 递推回归计算有效的滤除了部分干扰。由于其计算量少因此可以满足实时预报的要求。采用递推公式计算, 可比定义计算约提高 $5(n-1)$ 倍效率。该系统将在焦作电厂投入试运行。

参 考 文 献

- 1 裴世英, 张保衡 汽轮机转子的疲劳寿命 中国电机工程学报, 1987, (4)
- 2 Zemlyr, Friderich Turbine Stress and Start-up Control System for the Thermal Monitoring of Steam Turbine Siemens Power Eng 1982, (3)
- 3 张保衡 200MW 中间再热汽轮机调峰运行转子热应力的计算分析 华北电力学院学报, 1989, (1)
- 4 林少宫主编 基础概率与数理统计 人民教育出版社, 1978

(责任编辑 魏星禄)

CALCULATION OF THERMAL RATE IN ANALYZING THERMAL STRESSES

Zhang Jiazhong, Xia Songbo, Zhang Ying

(Power Engineering Dept Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

ABSTRACT The real- time monitoring of rotor life consumption makes urgent demands on exact real- time calculation of the thermal rate in analyzing thermal stresses. In order to eliminate the data fluctuation in temperature sampling and meet the demands of real- time calculation, the zone linear regression is adapted to accomplish the data filtering of thermal rate curves instead nonlinear regression, and the time subdomains are so divided, that the later one covers as much as possible the data of former one except first sampling data. As a result, a recurrence formula of the regression has been worked out. The exactness of the formula has been verified by numerical simulation. The convergence and filtering efficiency of the method are very well.

Key Words Thermal rate Thermal stress Regression analysis

RESEARCH ON BENDING FATIGUE LIFE PREDICTION METHOD OF AIRCRAFT GEARS

Xu Yingqiang, He Dawei, Qian Guanliang

(7th Dept Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT The limitations of the conventional bending fatigue life prediction method for aircraft gears are investigated and the applicability of local stress- strain approach to the gear bending fatigue life analysis is researched. Some valuable conclusions have been drawn from comparison between the computational results and experimental data.

Key Words Gears Lifetimes Prediction technique

EFFECTIVENESS OF AN ADVANCED HYBRID SQUEEZE FILM DAMPER ON NONSYNCHRONOUS RESPONSE SUPPRESSION

Zhu Changsheng

(Dept of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

ABSTRACT The effectiveness of an advanced Hybrid Squeeze Film Damper (HSFD) without the retainer springs on suppressing the nonsynchronous response of the rotor system was studied theoretically. A flexible rotor supported on the orifice- compensated HSFD is taken as an example. It is shown that the HSFD is able not only to improve obviously the highly nonlinear behaviours of the conventional squeeze film dampers, but also to enhance its capability of nonsynchronous response suppression greatly.

Key Words Rotors Dampers Non- linear Dynamic properties

A RING- LIKE METAL RUBBER DAMPER

Wang Xin and Zhu Zigen

(4th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT A new kind of rotor damper, Ring- like Metal Rubber Damper (RMRD), has been invented. Its application to a rotor rig shows that RMRD has excellent damping property and linear characteristics. RMRD has better damping effects and can with-