

# 汽轮机转子对中调整参数的数值分析方法

芮晓明, 李 林, 孙卫国

(华北电力大学能源与动力工程学院 电站设备状态检测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

**摘 要:** 针对汽轮机检修和安装过程转子系统轴系对中调试参数的计算问题, 提出了以被调整轴瓦数最少, 调整量最小为目标的优化调整方案, 建立了相应的调整关系分析模型。基于遗传算法和惩罚函数算法提出了一种数值分析方法, 使通常单独使用的惩罚函数搜索寻优算法和遗传算法的某些局限性得以改善, 可有效地解决多目标规划搜索过程易陷入局部优化和计算效率低等问题。此方法应用到汽轮机转子轴系对中调整方案的参数分析过程, 可显著提高计算效率, 有效地减少轴系的调整工作量, 为机组的提前装复和投产提供技术保障。

**关 键 词:** 汽轮发电机组; 转子对中参数; 数值分析方法; 轴瓦调整方案优化; 遗传算法

中图分类号: TK263.6 文献标识码: A

## 引 言

为保证大型汽轮发电机组的安全运行和使用寿命, 在机组的安装或检修过程中需要对其转子轴系部件进行精确的对中调试, 以保证各转子轴线间的相互关系。解决此类问题目前多采用经验法或图解估算法, 往往困难以及时地确定合理的调整方案而影响设备调试工作的效率甚至导致返工, 延误安装或检修工期。因此研究多转子系统对中调试参数的数值分析方法和优化调整技术十分必要。

## 1 机组转子轴系的对中原理

### 1.1 轴系参数分析模型

以 200 MW 发电机组为例, 模化出多转子轴系模型如图 1 所示。各转子一般采用两轴承支撑方式, 通过相应的刚性联轴器联接成旋转轴系。所谓转子的对中是研究各转子轴线间的相互关系问题。

### 1.2 轴系转子对中调整的方法

转子对中调整的基本方法为: 首先设法使各转

子与联轴器的安装满足确定的位置精度要求; 将转子初装至轴承座并通过松联组成轴系后盘车, 检测转子的对中情况。根据对轴系各联轴器在特定位置的检测数据的综合分析, 计算出各支撑轴瓦的调整参数, 通过对轴瓦相对位置的调整获得正确的转子轴线关系。

### 1.3 对中调整过程的参数及其分析

对中调整参数主要涉及对各轴瓦调整量的确定。如图 2 所示, 测得某联轴器的圆周差值  $\Delta A$ 、 $\Delta B$  和端面差值  $\Delta a$ 、 $\Delta b$ , 若其中某些值超出允许范围, 则需要通过分析得到相应转子各支撑轴瓦在水平、垂直方向的调整值, 改变当前转子中心的位置, 以满足安装的技术要求。

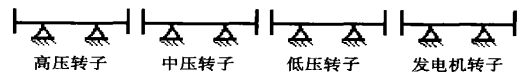


图 1 200 MW 机组物理模型

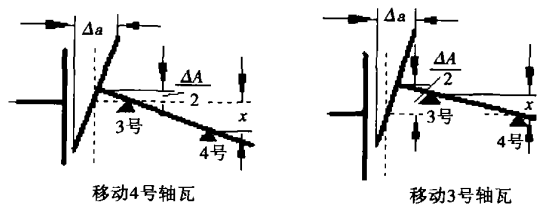


图 2 移动轴瓦改变端面及圆周差的示意

考虑对某联轴器在水平方向的检测值与转子支撑轴瓦的关系(见图 2), 当其中任一轴瓦移动距离  $x$  时, 均会使端面差  $\Delta a$  和圆周差  $\Delta A$  产生变化。对于两转子的情况(如电机驱动的水泵)只需几何计算即可简单地确定此调整值, 而对于多转子轴系, 问题要复杂得多。以图 1 所示的系统为例, 若发现中压转子与相邻转子有对中偏差, 在确定其调整参数时需要分析若干轴瓦的可能位移与整个轴系的关系, 因

而消除上述偏差的调整方案可能很多。此外,由于机组安装工艺的限制,还要考虑诸多的约束因素。

迄今,确定发电机组对中调整参数一般采用图解方法,即依据对中检测数据做出轴系调整结构简图,再利用经验分析估算出轴系各轴瓦的调整量。这种方法花费时间长,且很难将所有可行调整方案加以枚举后确定较好的方案,因而一般得到的是一组可行解。鉴于大型机组转子系统调整工作的复杂性,确定合理的调整方案对提高检修效率和质量非常重要。实际上,有关机组转子轴系对中调整参数的计算完全可转化为多目标函数的数学规划问题。

## 2 转子轴系对中调整的数学模型

为获得优化的调整方案,需要建立转子轴系对中检测数据与轴瓦调整参数一般关系的数学模型,以便进一步的计算处理。通过对发电机组转子轴系安装工艺的分析,确定各轴瓦调整方案优化的基本原则为:

(1) 在保证各联轴器端面、圆周允差及轴承中心和机组动、静子间隙等要求的前提下,调整值为零的轴瓦(即轴瓦不用调整)数量(number)越多越好;

(2) 需要调整轴瓦的调整值( $f$ )越小越好。

依此原则建立以下数学模型。

目标函数:

用  $M_i$ 、 $N_i$  分别表示各轴瓦在铅垂和水平方向的调整状态,需调整时取 0,不调整时取 1,则有:

$$\text{number} = \max \sum_{i=1}^n (M_i + N_i) \left\{ \begin{array}{l} M_i = \begin{cases} 1, & y_i = 0 \\ 0, & y_i \neq 0 \end{cases} \\ N_i = \begin{cases} 1, & \begin{cases} M_i = 1 \\ x_i = 0 \end{cases} \\ 0, & x_i \neq 0 \end{cases} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$f = \min \left( \sum_{i=1}^n |y_i| + \sum_{i=1}^n |x_i| \right) \quad (2)$$

式中:  $x_i$ 、 $y_i$ —轴瓦在铅垂、水平方向的调整值;  $n$ —转子轴系的支撑轴瓦数量。

约束函数:

(1) 考虑各静止部件中心允差及其与转子的标准间隙,并设综合允差为  $\hat{\alpha}_i$ 、 $\hat{\beta}_i$ ,则轴瓦的调整参数需满足:

$$fx_i + Wx_i \leq \hat{\alpha}_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$fy_i + Wy_i \leq \hat{\beta}_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中:  $fx_i$ 、 $fy_i$ —各静止部件中心的测量值;  $Wx_i$ 、 $Wy_i$ —因调整引起的各动静部件间隙的变化量;

(2) 联轴器中心偏差及端面偏差允许值;

(3) 各轴瓦允许调整的范围:

$$x_i \leq x_{0i} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

$$y_i \leq y_{0i} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

式中:  $x_{0i}$ 、 $y_{0i}$ —各轴瓦沿水平、垂直方向的允许调整值。

## 3 算法分析

上述的多目标规划问题可能产生若干可行解,若用一般的搜索法求解,计算耗时较长,更重要的是这种搜索过程极易陷入局部优化解。所以需要有关转子对中调整参数的计算问题进行分析,以提高计算效率并努力使算法有高度的鲁棒性。

### 3.1 初步算法与遗传算法分析

遗传算法(Genetic Algorithm, 以下简称 GA)是一种基于自然选择原理和遗传机制的搜索寻优算法。该方法在计算中模拟生物进行机制,在人工干预的系统中易实现特定目标的优化。GA 的优点是擅长全局搜索,且不需要对问题的性质作深入的数学分析。

比较 GA 与线性搜索法可发现:线性搜索法的求解过程需要首先在解可能存在处选一初始点,通过分析目标函数的特性后再由初始点移到一个新点,并继续此过程。这种搜索过程是确定的,需要通过产生一系列的点并收敛到优化解(有时是局部最优解)。与线性搜索法不同,GA 的搜索过程是随机的,可产生一系列随机种群序列。这两种算法的差异主要表现在:

(1) 线性搜索法的初始点仅一个,需要由决策者给出;而 GA 的初始点可能有多个,且能随机产生。

(2) 线性搜索法需通过分析目标函数的特征,由上一点产生新的点;GA 则是通过遗传操作,经对当前种群的选择、交叉和变异操作产生下一代种群。

### 3.2 遗传算法与其它优化方法结合的可行性

应指出:由于本文所涉及的问题并不是人工干预系统,不能直接引入 GA 求解。对转子调整参数计算及其类似的多目标规划问题,需要结合对约束优化问题算法的进一步分析,研究构造新算法的可行性。

约束优化问题的一般解法包括随机试验法、复合形法等弱搜索方法以及拉格朗日乘子法、惩罚函数法等强搜索方法。而 GA 应介于弱搜索与强搜索

方法之间。

弱搜索方法是通过对伪随机数的抽样进行搜索, 搜索的效率较低。GA 所以优于弱搜索方法的原因在于, 利用遗传算子能启发式地自适应搜索到全域优化解的区域, 因此将弱搜索方法与 GA 结合意义不大。强搜索方法主要利用梯度等确定性信息引导搜索, 其特点是搜索效率高, 但却容易陷入局部解。而 GA 优于强搜索方法正是在于不偏向局部解。所以将 GA 与强搜索方法加以结合, 构造一种求解约束优化问题的算法是可行的。

考虑两种可能与 GA 结合的约束优化问题搜索求解方法拉格朗日乘子法和惩罚函数法, 若采用前者, 可能使优化变量比原问题有所增加。这样, 当约束条件(尤其是不等式约束)较多时, 会增加 GA 的位串编码难度和位串的长度。由 Holland 图式原理知, 定义长度短、确定位数少且适应度高的图式数量将随遗传代数的增加呈指数增长。因此, 位串长度的增加不仅会降低搜索效率, 也会使原问题变量的编码码元夹杂在大量附加变量的码元中, 极可能导致在遗传过程中丢失与原问题有关的重要信息。因此, GA 与拉氏乘子法结合求解约束优化问题存在固有的局限性。而惩罚函数法求解约束优化问题尽管也要通过构造惩罚函数将原问题转化为无约束优化问题, 但注意到由约束条件构成的惩罚项的乘法因子是已知值, 优化变量较原问题并没有增加, 所以笔者认为将 GA 与惩罚函数法结合, 构造新的算法求解约束优化问题是可行的。

### 3.3 新算法与计算模型的构成

在上述分析基础上, 作者设计了一种“遗传算法+惩罚函数法”相结合的优化算法, 并发现此算法非常适合求解复杂的约束优化问题。引入 GA 构造的算法可以克服了一般优化方法的弱点, 能够较容易得到理想的全域优化解。

依据求解方案计算的要求, 对式(1)~式(4)表达的转子对中与各轴瓦调整方案的一般数学模型做出必要转化, 重新构造的计算模型。

目标函数:

$$f(x, y) = \min \left[ \sum_{i=1}^n P_i (Q_i |y_i| + |x_i|) \right] \quad (5)$$

式中:  $P_i$ —第  $i$  个转子的惩罚因子。当第  $i$  个转子设定为“调整”状态时, 惩罚因子  $P_i = 1$ ; 当第  $i$  个轴瓦设定为“不调整”状态时, 惩罚因子  $P_i = 1000$ 。考虑到轴瓦在沿垂直于转子轴线方向的调整操作较复杂, 调整参数需优先选择水平方向, 以  $Q_i$  表示第  $i$

个轴瓦沿垂直方向调整惩罚因子, 不需要进行垂直方向调整(即  $y_i = 0$  时),  $Q_i = 1$ , 否则  $Q_i = 100$ 。

经重新构造的约束函数为:

(1) 在沿转子轴线平行和垂直方向, 各静止部件中心偏差  $fx_i$ 、 $fy_i$  以及因转子调整引起的动静部件间隙的变化量  $Wx_i$ 、 $Wy_i$ , 与其综合允差  $\hat{\alpha}_i$ 、 $\hat{\beta}_i$  应分别满足下式中的约束  $y_{1i}(x, y)$  和  $y_{2i}(x, y)$ , 即:

$$\begin{aligned} y_{1i}(x, y) &= fx_i + Wx_i - \hat{\alpha}_i \leq 0 \\ y_{2i}(x, y) &= fy_i + Wy_i - \hat{\beta}_i \leq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

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

(2) 考虑各联轴器在沿转子轴线平行和垂直方向的端面偏差  $a_{xi}$ 、 $a_{yi}$  和中心偏差  $A_{xi}$ 、 $A_{yi}$  应满足相应的允差  $\Delta X_i$  和  $\Delta Y_i$ , 即满足约束:

$$\begin{aligned} y_{3i}(x, y) &= |a_{xi} + a_{yi}| - \Delta X_i \leq 0 \\ y_{4i}(x, y) &= |A_{xi} + A_{yi}| - \Delta Y_i \leq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

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

(3) 考虑各轴瓦沿转子轴线平行和垂直方向的调整量  $x_i$ 、 $y_i$  在其允许调整范围  $x_{0i}$  和  $y_{0i}$  内的约束函数为  $y_{5i}(x, y)$  和  $y_{6i}(x, y)$ :

$$\begin{aligned} y_{5i}(x, y) &= x_i - x_{0i} \leq 0 \\ y_{6i}(x, y) &= y_i - y_{0i} \leq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

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

以式(5)~式(8)为基础, 构造带惩罚因子的增广目标函数  $F(x, y)$  为:

$$\begin{aligned} F(x, y) &= f(x, y) + c_1 \sum_{k=1}^n [\max(y_{1k}(x, y), 0)^2] + c_2 \sum_{k=1}^n [\max(y_{2k}(x, y), 0)^2] \\ &+ c_3 \sum_{k=1}^n [\max(y_{3k}(x, y), 0)^2] + c_4 \sum_{k=1}^n [\max(y_{4k}(x, y), 0)^2] \\ &+ c_5 \sum_{k=1}^n [\max(y_{5k}(x, y), 0)^2] + c_6 \sum_{k=1}^n [\max(y_{6k}(x, y), 0)^2] \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $c_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ —约束函数的惩罚因子。

式(9)表述的单目标无约束优化问题是完全可用遗传算法求解的。对各不可行解的惩罚度将随  $c_i$  值的设定增大, 从而保证获得全域优化的效果更好。通过计算测试和现场的比对调试实验, 将本文求解问题的  $c_i$  值统一设定为 100 000。

通过计算测试发现, 当染色体数目  $20 \leq \text{pop-size} \leq 30$  时, 其交叉概率区间  $0.3 \leq p_c \leq 0.4$ 、遗传概率  $0.2 \leq p_m \leq 0.3$ 。注意到染色体数目、交叉概率和遗传概率取值的增大可能使系统的运算速度显著降低, 而循环次数  $M$  的增大却未见明显降低运算效率, 将本算法的初始参数设定为,  $\text{pop-size} = 30$ 、 $p_c = 0.3$ 、 $p_m = 0.2$ 、 $M = 200$ 。

为了提高转子轴系对中参数寻优分析的效率,

对所用遗传算法采取了以下措施:

- (1) 每次均将最优的一个父代保留至子代;
- (2) 交叉和变异的过程中, 在指定的交叉/ 变异次数内, 以最好的子代来代替父代(如子代均劣于父代, 则保留父代不变)。

### 3.4 算法的验证与分析

为验证算法的实用性, 结合河北马头和邢台发电厂的机组检修工作, 分别采用一般惩罚函数算法和本文提出的“遗传算法+惩罚函数法”相结合的优

化算法, 对 2 台 200 MW 发电机组转子系统轴系的多组对中参数的计算问题进行了分析测试。

表 1 所列是机组某次检测的数据和相应的标准值, 对检测结果中的超标数据需要通过分析计算, 确定转子各支撑轴瓦相应的调整量, 使之能够达到转子对中的技术要求。计算测试过程首先采用一般的惩罚函数算法求解式(1)~式(4)表述的有关约束优化问题, 获得满足标准值的转子对中轴系调整优化方案的计算处理耗时约为 25~30 min。

表 1 河北马头电厂 2 号机组的某次转子对中检测记录

高一中压转子		中一低压转子		低压—发电机转子	
检测值/mm	标准值	检测值/mm	标准值	检测值/mm	标准值
高压侧中心低 0.61	< 0.02	中压侧中心高 0.05	< 0.04	低压侧中心高 0.002	< 0.04
高压侧中心偏左 0.06	< 0.02	中压侧中心偏右 0.005	< 0.03	低压侧中心偏右 0.005	< 0.04
联轴器左张口 0.083	< 0.02	联轴器右张口 1.017	< 0.02	联轴器左张口 1.22	< 0.03
联轴器下张口 1.166	0.2	联轴器下张口 0.002	0.02	联轴器下张口 0.008	0.02

结合文中对机组模型和有关转子轴系对中调整关系的讨论可知, 各轴瓦的调整参数具有相关性, 在确定调整方案时需要分析若干轴瓦的可能位移与整个轴系的关系。因此, 采用一般搜索算法的寻优过程, 需要遍历各种可行解, 为保证计算精度还要设置合理的计算步长。以表 1 高一中压转子调整为例, 为消除垂直方向的中心高和张口偏差, 搜索算法需要从高一中压转子相关的某一轴瓦可能的调整移动开始(见图 1), 设定初始值并根据数学模型计算此解是否可行; 此后要按设定步长增量(如 0.01 mm)逐次计算分析该轴瓦调整与转子对中的关系; 在确定相应的所有可行解后, 轮换其它轴瓦进行其它可行方案的搜索。可以发现, 随着参与调整轴瓦数  $n$  和检测值与标准值差距的增加, 这种可行解的数量巨大。由于这种搜索过程是逐点展开, 所得出的调整方案可能具有局限性, 所以在遍历可行解后, 还需要对各种可行解做进一步的分析比较, 并调整某些参数再多次计算才有可能获得全域优化解。因此, 此种算法的计算处理效率低, 耗时较多。当然, 为提高该算法的寻优计算效率可以适当加大计算步长, 但要以降低精度为代价, 难以满足现场检修施工希望更多关注轴瓦调整个数以提高机组检修效率的要求。考虑到实际的机组检修过程一般要进行若干次的转子对中检测和调整, 这样的计算效率显然是不能容忍的。

针对相同的数据组, 采用了本文所述新算法求解式(9)表述的转子对中参数计算问题。测试结果

表明, 采用新算法的平均计算处理时间为 90 s, 所得出的计算结果与上述一般搜索算法获得的轴系全域优化调整方案吻合。表明本文所提供的数值分析方法可以使寻优计算的过程得以明显改善, 有效地解决汽轮机转子对中调整参数的计算效率问题。

实际上, 通过文中所述算法的分析可以发现, 该算法的特点在于采用 GA 的搜索求解的思路, 并根据计算问题需要重新构造了带惩罚因子  $c_i$  的新计算模型(见式(9)), 使需要由式(1)~式(4)表述的有关转子轴系对中参数的多目标约束优化问题转化为单目标的无约束优化计算问题, 此类问题完全可以采用遗传算法进行求解。这种求解过程可以在对所计算问题经过初步计算后, 通过对各不可行解的惩罚因子的判断进行遗传操作, 对当前的若干可行解进行选择、交叉和变异, 并产生新一代种群。同时, 对于本文所述问题, 还可以在这种多点并行比较搜索过程中, 根据需要设置相应的计算步长, 在保证计算精度的前提下, 进一步加速计算中不理想解的舍弃过程, 因而使计算能迅速接近理想解, 获得全域优化调整方案。

## 4 结 语

通过对汽轮机检修过程转子轴系对中调试问题的分析, 构造了相应的多目标规划数学模型, 提出了

(下转第 20 页)

表 1 静压靴最大变形和最大应力计算结果( $v=182.2\text{ m/s}$ )

密封间隙 / mm	密封压差 / MPa	最大变形 / mm( $\times 10^{-2}$ )	最大径向变形 / mm( $\times 10^{-2}$ )	最大轴向变形 / mm( $\times 10^{-2}$ )	最大应力 / MPa
0.02	0.2	0.280	0.274	0.058 2	30.4
	0.3	0.391	0.382	0.081 2	42.4
	0.4	0.472	0.458	0.114 1	51.2
0.038 1	0.2	0.251	0.246	0.052 4	27.4
	0.3	0.329	0.321	0.068 5	35.8
	0.4	0.401	0.393	0.083 7	43.7

## 4 结 论

(1) 通过对流体静压型指尖密封的流场、泄漏及变形和应力的数值计算表明, 流体静压型指尖密封具有小变形和小应力的优点。

(2) 密封间隙是影响泄漏的最主要因素, 压差越大泄漏越明显, 并且, 相同压差对大间隙泄漏的影响要比小间隙泄漏的影响明显得多; 沿周向泄漏是主要泄漏通道, 并且间隙越小周向泄漏越明显。

(3) 压差一定时, 间隙越小, 静压靴的变形和应力越大; 间隙一定时, 压差越大, 静压靴的变形和应力越大, 并且相同压差对大间隙的影响要比小间隙的影响要明显。

## 参考文献:

- [1] MACKAY CHARLES G, WRIGHT E SCOTT. Laminated finger seal [ P ] . Patent US5042823A, 1991.
- [2] MARGARET P PROCTOR, IREBERT R DELGADO. Leakage and power loss test results for competing turbine engine seal[ J ] . American Society of Mechanical Engineers(ASME) Turbo Expo, 2004 4: 441- 451.
- [3] A RORA GULSHAN K. Noncontacting finger seal with hydrodynamic foot portion[ P ] . Patent US05755445A, 1998.
- [4] PROCTOR MARGARET P, STEINETZ BRUCE M. Noncontacting finger seal[ P ] . Patent US2004155410, 2004.
- [5] BRAUN M J, PERSON H M, KUDRIAVTSEV V V. Finger seal solid modeling design and some solid/ fluid interaction considerations[ J ] . Tribology Transactions, 2003, 46(4): 566- 575.
- [6] 王 旭, 张文平. 指尖密封泄漏流动的数值仿真分析[ J ] . 航空动力学报, 2005, 20(4): 590- 594.

(何静芳 编辑)

(上接第 14 页)

以调整轴瓦数最少, 调整量最小为目标的优化调整方案。

鉴于一般的搜索寻优算法求解本文问题的局限性, 作者提出了一种适用的数值分析方法——遗传算法+ 惩罚函数法, 并进一步构造了新的数值计算模型, 使通常单独使用的搜索寻优算法和遗传算法的某些局限性得到改善, 可以有效地解决有约束多变量规划问题全域优化的求解问题, 同时大幅度地提高计算效率。

经在发电厂机组实际检修过程的试用表明: 采

用本文提供的方法, 显著提高了汽轮机组转子部件对中调整方案的优化计算效率, 能够有效地减少机组检修调整的工作量, 为机组的提前装复和投产提供技术保障。

## 参考文献:

- [1] 周礼泉. 大功率汽轮机检修[ M ] . 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [2] 刁在筠. 运筹学[ M ] . 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [3] 芮晓明. 汽轮发电机组轴系自动检测系统的研究[ J ] . 现代电力, 2001, 18(2): 1- 6.

(何静芳 编辑)

直接碳燃料电池技术研究进展分析= **An Analysis of Technical Research Advances in Direct Carbon Fuel Cell Technology**[刊, 汉]/ LI Chen, SHI Yi-xiang, CAI Ning-sheng (Education Ministry Key Laboratory on Thermodynamic Sciences and Power Engineering under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22 (1). — 1~5

Direct carbon fuel cells (DCFC) can directly transform the chemical energy inside a solid carbon fuel to electrical energy cleanly and efficiently. They are of major significance for rational utilization of coal, control of pollutants and reduction of CO<sub>2</sub> emissions. To date, several kinds of DCFC have been developed with fusible carbonate, fusible hydrate and solid oxide serving as an electrolyte. However, compared with other fuel cell technologies, the research on DCFC technology is still in its infancy. A survey of the development course of the DCFC technology and status quo of its research are given along with a classification of the DCFC now available. Analyzed and compared also are their working mechanism and performance features as well as CO<sub>2</sub> emissions reduction characteristics. Moreover, on the basis of summarizing various technically intractable problems, a forecast of the possible future development trend of the DCFC technology is also given. **Key words:** direct carbon fuel cell, fusible carbonate, fusible hydrate, solid oxide

基于 ARMA 及神经网络的汽轮机振动故障诊断研究= **A Study of Turbine Vibration-fault Diagnosis Based on an ARMA and a Neural Network**[刊, 汉]/ LIANG Ping, WU Geng-shen (College of Electric Power under the South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640), LONG Xin-feng (College of Chemical Industry and Energy Sources under the South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 6~10

Based on an ARMA (auto-regression moving average) model for turbine rotor vibration-fault series, the authors have calculated the self-spectral functional values through the use of ARMA model parameters and established a self-spectral function atlas for turbine rotor vibration-fault time series. The model has been established by using the data of four typical turbine rotor vibration faults all acquired on a Bently test rig in both horizontal and vertical directions, namely, rubbing, loosening, misalignment and unbalance. An analysis of the above atlas of the ARMA model set up for different kinds of faults shows that the information featuring fault symptoms is relatively clear, displaying a comparatively good division between various fault zones. Moreover, as the eigenvectors of the ARMA model have concentrated all the information of the original time series signals, a non-linear mapping for the eigenvector parameters of the ARMA model from a p-dimensional Euclidean space to a two-dimensional one has been performed by using a multi-node input dual hidden-layer BP neural network in order to conduct a diagnosis of the status of a turbine rotor vibration fault. The diagnosis result indicates that the specimens of the ARMA model for a corresponding type of faults can relatively well classify the faults in a two-dimensional Euclidean space through the use of a neural network which has undergone a training. The inspection specimen for the same type of faults have kept a minimal distance from the target functional value in a Euclidean space. The foregoing shows that the ARMA model-based fault diagnostic method of a two-dimensional Euclidean space and dual hidden-layer neural network has a comparatively high ability to discriminate faults. **Key words:** turbine rotor vibration, fault diagnosis, time series, self-spectral function, neural network

汽轮机转子对中调整参数的数值分析方法= **A Numerical Analysis Method for Parameter Adjustment in the Alignment of Steam Turbine Rotors**[刊, 汉]/ RUI Xiao-ming, LI Lin, SUN Wei-guo (Education Ministry Key Laboratory on Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment, College of Energy and Power Engineering under the North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 11~14, 20

Concerning the calculation of parameters involved in the alignment of a shafting in a rotor system during the overhaul and installation of a steam turbine, the authors have presented an optimized adjustment scheme to minimize both the number of bearing bushes to be aligned and the adjustment work load and have also established a model for analyzing relevant regulation relations. A numerical analysis method has been put forward based on a genetic algorithm and penalty function one, thus eliminating some limitations present when penalty-function optimum-seeking algorithm and genetic algorithm are

used separately. In addition, one can also effectively solve such problems as a partial optimization solution and low calculation efficiency, associated with the process of multi-target project searching. The method under discussion can significantly raise the calculation efficiency and efficaciously reduce shafting regulation work load when applied to the parameter analysis of various alignment versions for the shafting of a turbine rotor system, providing a technical safeguard for achieving an ahead-of-schedule reassembly and put-into-operation of steam turbine units. **Key words:** turbogenerator unit, rotor alignment parameter, numerical analysis method, optimization of bearing bush adjustment scheme, genetic algorithm

流体静压型指尖密封数值仿真分析 = **A Numerical Simulation Analysis of Hydrostatic Fingertip Seals** [刊, 汉] / WANG Xu (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), YUE Guo-qiang, ZHANG Wen-ping, ZHENG Qun (College of Power and Nuclear Energy Engineering under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 15 ~ 20

On the basis of analyzing advantages and disadvantages of contact type fingertip seals and hydrodynamic type ones, the authors have presented a hydrostatic fingertip seal and with this type of seal serving as an object of study, established a mathematical model and calculation method for analyzing fluid-solid interaction in the hydrostatic fingertip seals. A numerical calculation and analysis were conducted by taking account of the main factors influencing the leakage and deformation of the above-mentioned seals. The calculation results indicate that the above-mentioned seals enjoy such merits as a small deformation and low leakage. Seal clearance is a main factor influencing the leakage with the circumferential leakage accounting for a major one. The smaller the clearance, the more conspicuous the circumferential leakage. When the pressure difference is constant, the smaller the clearance, the greater the deformation and stress of the hydrostatic pad. When the clearance is constant, the bigger the pressure difference, the greater the deformation and stress of the hydrostatic pad. **Key words:** hydrostatic pressure, fingertip seal, fluid-solid coupling, leakage

叶轴形状对旋风子性能影响的研究 = **Research Findings Concerning the Effect of Axle Shapes on the Performance of Cyclone Separators** [刊, 汉] / WANG Zhong-yi, SUN Hai-ou, WANG Song (College of Power and Energy Engineering under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), WANG Ming-xin (Naval Representative Office Resident in Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 21 ~ 24

The authors have studied a kind of high-concentration salt-mist separating device-cyclone separator, and numerically simulated under rated operating conditions three models of cyclone separators featuring three axle shapes, namely, 1. hollow cylinder shape, 2. slim solid truncated cone shape and 3. podgy solid circular truncated cone shape. The drag force characteristics of the corresponding models and their separation-efficiency characteristics at different particle diameters have been given. Meanwhile, on a specialized wind tunnel test rig, drag force and separating efficiency characteristics of the three models were also tested. The test results show that model No. 2 has a relatively stable separating efficiency and a comparatively small drag-force loss with its overall performance being better than that of the other two models. When comparing the test results with the numerical simulation ones, one can find that they are in good agreement, thus providing reference data for further investigations. **Key words:** salt mist separating device, cyclone separator, axle shape, numerical simulation

一种基于数据挖掘的入炉燃料发热量在线智能软诊断方法研究 = **A Study of the Method for an On-line Intelligent Soft Diagnosis of In-furnace Fuel Low Heating Values Based on Data-mining** [刊, 汉] / LI Bi-cheng (Guang-dong Province Yuedian Group Zhuhai Power Station, Zhuhai, China, Post Code: 519050), SHENG Sai-bin (Automation Department, Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 25 ~ 28

Coal quality fluctuations in many Chinese coal-fired power plants have posed a serious threat to boiler stable combustion and safe operation. The main contradiction lies in an excessively low heating value of fuel. Taking account of the charac-