

电磁式在线自动平衡系统及其动平衡方法研究

汪希萱, 曾 胜

(浙江大学 化工机械研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 提出了一种新型的在线自动平衡系统, 论述了其原理、结构和动平衡方法。该系统在旋转机械的轴上装有一个或一个以上的自动平衡头, 平衡头的定子能产生非接触的电磁力, 以拖动装在旋转轴上的平衡盘。每个平衡头有两或三个平衡盘, 每个盘上均有平衡块(或称为平衡质量)。这些平衡重所合成的总的平衡矢量就可以对转子的失衡进行平衡。轴的振动和平衡盘的位置均有相应的传感器探测。平衡盘采用单向移动方式, 这种移动方式可以大幅简化控制系统。文中讨论了使转子达到动平衡的平衡盘的移动原则和步骤, 并在具有挠性转子的实验台上进行了成功的动平衡实验。

关 键 词: 自动平衡; 在线动平衡; 电磁式平衡头

中图分类号: TK263.6 文献标识码: A
符 号

K : 平衡头的个数;

M : 测点个数;

A : 影响系数矩阵;

β_1, β_2 : 平衡块的位置;

U : 平衡块的位置组成的矢量;

β_{kj} : 在第 k 个平衡头上的第 j 个平衡块的位置;

$V_{\text{rotor}} e^{i\theta}$: 由转子上的不平衡量引起的振动;

J : 二次准则;

$\Delta\beta$: 平衡块的移动步长;

β_{kj}^0 : 第 k 个平衡头上的第 j 个平衡块的最优位置;

$i. c.$: 影响系数的缩写;

$STEP_{\text{total}}$: 总的移动步数;

$STEP_{\text{each}}^{kj}$: 第 k 个平衡头上的第 j 个平衡块的位置移动步数。

1 引 言

汽轮机、透平、鼓风机和其它旋转机械在运行中, 常会由于零件配合松动、介质对零件的冲蚀、粘附等作用失去动平衡, 而引起较大的振动。这时就需要停机进行动平衡由此带来经济损失, 为了降低

动平衡的停机时间而减少经济损失, 最理想的方法是在不停机、不打乱操作状态下在线自动进行动平衡。

现在有两类在线自动平衡方法。第一种是从外部对转子加上同步外力。该力与转子上的不平衡离心力平衡, 这样来消除转子的同步振动。在这种方法中通常使用的是电磁作用器^[1~2]。其优点是反应快速, 缺点是没有从根本上消除产生振动的不平衡。第二种方法是使转子上的质量重新配置, 使转子质心轴线与转子弹簧轴线趋近, 从而消除不平衡。Van de Vegte 在 20 世纪 70 年代提出的在线自动平衡头是一个第二种方法的经典方案^[3]。其原理如下: 该平衡头在转子轴上同心地安装两只齿圈, 而平衡重块就附在齿圈上。在转子需要进行动平衡时, 两个齿圈分别由两个装在转子上的电动机经按一定的平衡步骤进行驱动, 使平衡重块的合成矢量与转子的不平衡量矢量相反以达到平衡的目的。轴上的电动机由滑环装置供电, 该方案供电困难, 机构复杂。在他之后, 有不少人在他的基础上作了改进, 但主要原理仍与他相同。

在本文中, 首先简要地介绍一种概念全新的平衡头——电磁式自动在线动平衡头的原理和设计, 接着介绍一个带有挠性转子试验系统和平衡方法。

2 平衡头

图 1 是电磁式平衡头的示意图。它应用电机的工作原理, 由定子和带凸齿的圆形滑盘组成, 后者带有平衡重块。定子是齿状结构, 在它的每个齿上均绕有线圈(图上未画出)。滑盘在轴向由压板和弹簧、螺钉定位在滑盘座上。而滑盘座同心地固定在

收稿日期: 2002-03-20; 修订日期: 2002-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59575013)。

作者简介: 汪希萱(1928-), 男, 浙江杭州人, 浙江大学教授。

转子轴上。滑盘在定子线圈产生的非接触电磁力作用下可以作周向旋转,将平衡重块旋转到需要的方位。压板经弹簧施加到滑盘上的压力可产生适当的摩擦力,在转子变速时防止滑盘和平衡重块的惯性力改变盘的周向位置。平衡盘的位置由传感器来探定。当转子旋转及向定子线圈通电时,理论计算及实验观察均表明线圈对滑盘产生的力矩方向是周期地按逆转向及顺转向交替变换的。但是其平均力矩的方向是逆着转子旋转方向的。所以,带着平衡重块的滑盘在定子电磁力作用下,是逆转子转向而运动的。在这种平衡头中滑盘仅作单向运动。虽然它得按一定控制策略运动,但其结构和控制线路得以大幅简化,并且其工作转速也可以大幅提高。滑盘的角位移大小由通电时间、转子转速及所加电压等因素决定。由于滑盘仅作单向转动,故定义逆转子转向的角位移为正。

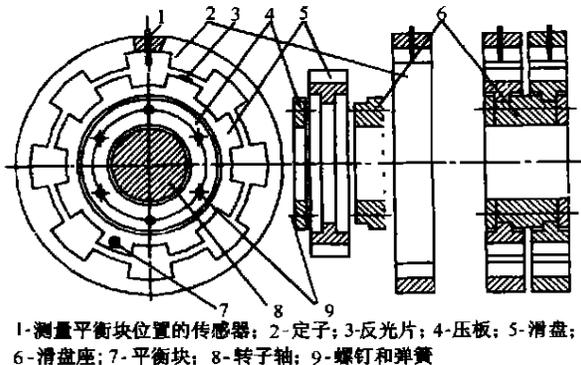


图 1 平衡头的结构

3 实验系统

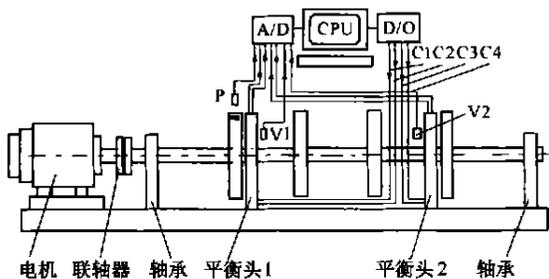


图 2 实验系统

图 2 是实验系统的示意图。转子轴直径为 24 mm,带有两个平衡头和 4 个重量各为 2.1 kg 的圆盘。两滚珠轴承座的中心距为 700 mm。轴由可调速电动机经柔性联轴器带动。转子系统固定在一底

板上,用一个光电传感器(图上标有 p 者)来定键相位。转子的振动由两个涡流传感器(标有 V1 和 V2)来测定。因此转子共有 7 路输出信号,即一路测键相位,四路测平衡块的位置和两路测振动信号。这些传感器输出的信号全部经 A/D 板输入计算机进行处理,计算机输出信号有 4 路,经 D/A 输出至功率放大器(在本系统中,功率放大器为继电器),在图上依次标为 C1 至 C4,放大后被输入动平衡头,用以控制平衡盘运动。

计算及试验表明,转子系统的第一和第二阶临界转速分别为 2 400 r/min 和 11 000 r/min,转子的的工作转速介于 2 000~3 000 r/min 之间,因而可认为该转子系统是挠性转子。

在实验中所用平衡头的某些参数如下:

平衡头的轴向宽度: 32mm; 平衡盘与定子间的半径间隙: 0.7 mm。

每个平衡盘上平衡重块的重径积:

$$2.5 \text{ g} \times 42 \text{ mm} = 10.5 \text{ g} \cdot \text{cm}$$

4 平衡方法

本文采用的平衡头带有平衡重块测位探头,可以用影响系数法进行平衡,与 Van de Vegte 平衡头用寻优法不同^{3~4},平衡时间可以大幅减少。文献 [7] 中详细介绍了影响系数平衡法,在本文中假定影响系数矩阵为 A。

对装有本文所述平衡头的转子,影响系数的测定是很方便的,无须停车加试重。只要在运行过程中,逐个地移动各平衡头上的平衡重,然后比较平衡重移动前后的振动值按要求计算即可。

5 平衡块移动步骤

平衡块固定在滑盘上,滑盘只能作单方向逆转子转向运动。如果每个平衡头两个滑盘即带两块平衡用的平衡块,在初始时,这些成对的平衡块处于对称位置,即 $\beta_1 \approx \beta_2 + \pi$,那么,在它们由对称位置向优化位置移动过程中,振动会单调地逐步降低。在转子工作一段时间后, $\beta_1 \approx \beta_2 + \pi$ 的条件不一定存在,在平衡块向优化位置移动过程中,振动不一定单调降低,可能会暂时升高,但最后会降至最小。为了使这种不良影响减小到最低程度,平衡块的移动步骤应该仔细设计。

一个带有 K 个平衡头的转子,假设有 M 个测

点。设各平衡块组成一 K 阶矢量 U , 各个测点振动 $V_m (1 \leq m \leq M)$ 组成一 M 阶矢量 V 。

$$U = [mr(e^{i\beta_{11}} + e^{i\beta_{12}}), \dots, mr(e^{i\beta_{k1}} + e^{i\beta_{k2}}), \dots, mr(e^{i\beta_{K1}} + e^{i\beta_{K2}})]^T \quad (1)$$

$$V = [V_1, \dots, V_m, \dots, V_M]^T \quad (2)$$

$$V = V_{\text{rotor}} e^{i\theta} + AU \quad (3)$$

在式(1)中, $\beta_{kj} (1 \leq k \leq K, j = 1, 2)$ 代表第 k 个平衡头上的第 j 个平衡重的当前位置。 β 角只能增加, 且能即时被测出。在式(3)中的 $V_{\text{rotor}} e^{i\theta}$ 代表转子上不平衡重(不包含平衡头上的平衡块)引起的振动。移动步骤是按二次律进行:

$$J = \sum_{m=1}^M |V_m|^2 = \sum_{m=1}^M \left[V_{\text{rotor}}^2 \cos^2 \theta + \sum_{k=1}^K \alpha_{mk}^2 \cdot mr^2 \times (\cos \beta_{k1} + \cos \beta_{k2})^2 + \sum_{m=1}^M \left[V_{\text{rotor}}^2 \sin^2 \theta + \sum_{k=1}^K \alpha_{mk}^2 \cdot mr^2 \times (\sin \beta_{k1} + \sin \beta_{k2})^2 \right]^2 \right] \quad (4)$$

$\beta_{kj}^0 (1 \leq k \leq K, j = 1, 2)$ 可由影响系数法求得。

平衡块一步步地以小步长 $\Delta\beta$ 移动。每块平衡块移动的步数 $STEP^{kj}$ 和全部平衡块移动的总步数 $STEP_{\text{total}}$ 可用下面方法算得:

$$STEP_{\text{each}}^{kj} = \frac{\beta_{kj}^0 - \beta_{kj}}{\Delta\beta} \quad (5)$$

$$STEP_{\text{total}} = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^2 STEP_{\text{each}}^{kj} = \sum_{k=1}^K \frac{(\beta_{k1}^0 - \beta_{k1}) + (\beta_{k2}^0 - \beta_{k2})}{\Delta\beta} \quad (6)$$

移动步序用一个长度为 $STEP_{\text{total}}$ 的整数数列来表述, 其中有 $STEP_{\text{each}}^{kj}$ 个整数 $2(k-1)+j$, ($1 \leq k \leq K, j = 1, 2$), 它代表需要移动第 k 个平衡头上第 j 块平衡重的次数。移动步骤实际上是如何安排 $STEP_{\text{total}}$ 次的移动的次序以使式(4)中的 J 值为最小。这是一个排列组合问题, 可以有多种解法, 例如模拟退火法或遗传算法^[5-9]。下面介绍一种称为局部分级法的简单、快捷算法。

当一个转子需要进行动平衡时, 希望在大振幅状态下停留的时间尽可能短, 振幅下降速度尽可能快。故应让 J 下降最多、最快的平衡块优先移动。由式(4), 在第 k 个平衡头上的第 j 个平衡块对 J 的影响在任一时间, 可由下式计算:

$$\frac{\partial J}{\partial \beta_{kj}} \quad (k = 1, 2 \dots K, j = 1, 2) \quad (7)$$

在式(4)中, 所有参数均为已知, 故式(7)是可以计算的。

最后, 安排 $STEP_{\text{total}}$ 中各元素次序的步骤可归

纳如下:

(1) 在计算机上将数列置零;

(2) 对所有的平衡块 $\beta_{kj} (1 \leq k \leq K, j = 1, 2)$, 计算 $\frac{\partial J}{\partial \beta_{kj}}$ 。考虑移动最小的 $\frac{\partial J}{\partial \beta_{kj}}$ 所对应的 β_{kj} , 如果它还没到达最优位置 β_{kj}^0 , 则将序数 $2(k-1)+j$ 放入数列。相反, 如果 β_{kj} 已到最优位置, 则考虑次小的 $\frac{\partial J}{\partial \beta_{kj}}$ 所对应的 β_{kj} , 依此类推;

(3) 将由步骤(2)中选定的 β_{kj} 加上 $\Delta\beta$ 作为下一步计算的初值;

(4) 重复步骤(2)和步骤(3)直至得到全部数列。

6 实验

在线动平衡实验在第二部分叙述的装置上进行。实验前, 影响系数按以下方法确定: 首先缓慢将转子加速到工作转速, 在加速过程中测量并记录振动矢量和各平衡块位置; 接着在最高工作转速下, 移动平衡头上的任一块平衡块, 记录移动的角位移。在此之后缓慢地降低转子的转速, 并记录减速过程的振动矢量; 最后计算影响系数。图3和图4为平衡头1对测点V1和V2的影响系数。图中(a)为影响系数的幅值, (b)为相位。

图3和图4中影响系数的峰值对应的转速为2400 r/min, 这就是转子系统的一阶临界转速。平衡头1对两个测点的影响系数基本相同, 这是因为两测点是对称分布的。

按照影响系数平衡法, 如果要降低振动峰值, 需要两个平衡头。如果这么做的话, 可以发现平衡头2对测点V1和V2的影响系数与平衡头1成正比, 这会使得影响系数矩阵奇异。在本文的实验装置中, 转子工作在第一第二阶临界转速之间。因此按照模态平衡法, 在工作转速范围内, 一只平衡头就足够用来平衡整个转子。

平衡过程如下所述: 先将转子从静止状态升速到一阶临界转速附近。在升速过程中, 如果振动过大, 则利用预先已知的影响系数计算平衡头1中的两平衡块的最优位置; 然后在计算机的控制下, 按照平衡块移动策略, 将平衡块移到预期的位置, 完成在线动平衡。

图5~图7和表1是动平衡实验的数据。图5

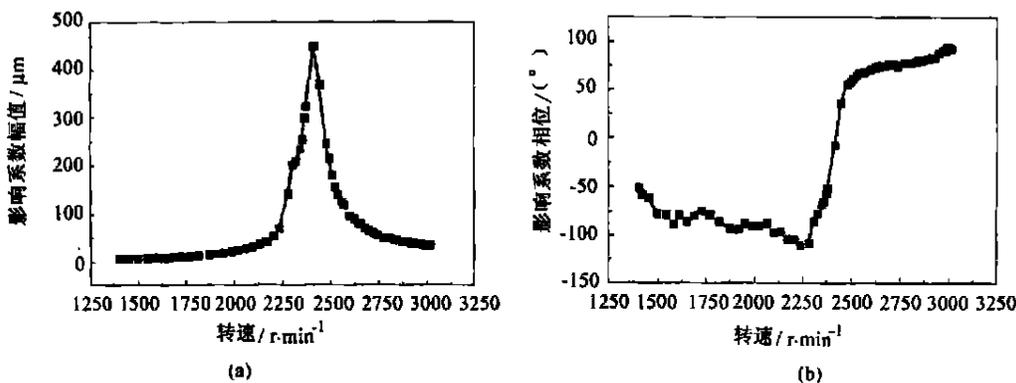


图 3 平衡头 1 对测点 V1 的影响系数

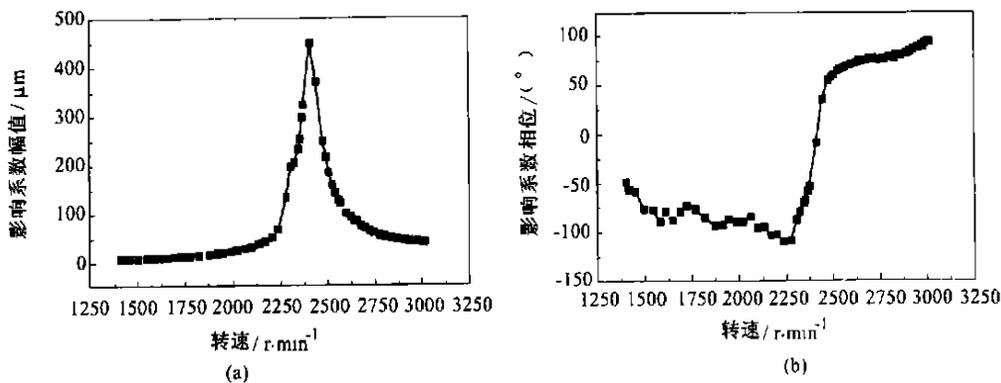


图 4 平衡头 1 对测点 V2 的影响系数

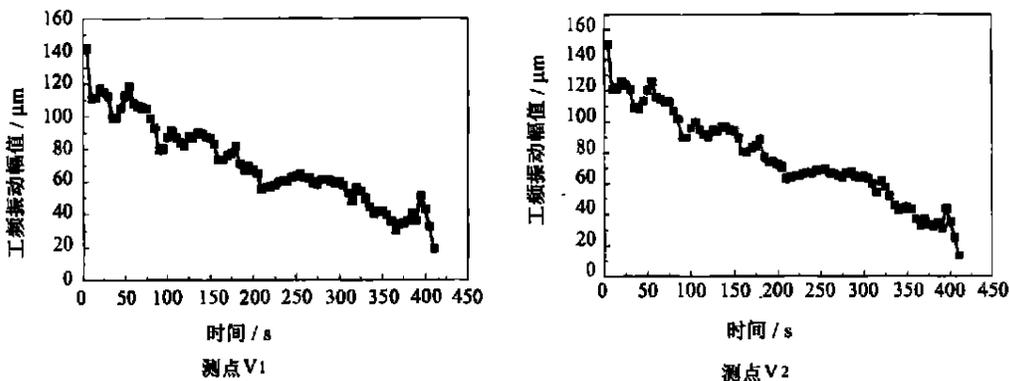


图 5 平衡过程中的振动变化情况

表 1 试验结果

平衡转速 / $r \cdot \text{min}^{-1}$	2 350	
在测点的初始振动 / μm	V1, V2	$150.0 e^{-170t}, 141.7 e^{-172t}$
平衡块的初始位置 / $^\circ$	β_{11}, β_{12}	24, 14
测点的终了振动 / (μm)	V1, V2	$13.8 e^{-66.4t}, 18.8 e^{-57.4t}$
平衡块的终了位置 / $^\circ$	β_{11}, β_{12}	317, 86

表示在平衡过程中测点振动的变化情况。图 6 是动

平衡前后在测点 V1 的波特图。测点 V2 的波特图和测点 V1 的几乎相同, 这里就不示出。在动平衡前, 当转子加速到临界转速附件时, 由于振动过大, 转子不能进一步加速; 相比之下, 在动平衡之后, 转子的振动在整个转速范围内大幅下降。特别在作动平衡的 2 350 r/min 的转速下, 测点 V1 和 V2 的振动分别从 150.0 和 141.7 μm 下降到了 13.8 μm 和 18.8 μm 。图 7 是在动平衡过程中平衡块位置的变化。

另一次实验是测试平衡头对慢时变的不平衡量的响应能力。在这次实验中平衡头 1 仍然作动平衡用, 而平衡头 2 用来模拟由于磨粒磨损, 黏性物质的沉积等原因而在转子上产生的不平衡量, 让平衡头 1 来跟踪并平衡平衡头 2 产生的不平衡量。本次实验的结果如图 8 所

示, 在实验中计算机产生随机信号驱动平衡头 2 以产生随机不平衡量。函数 J 为 $J = V_1^2 + V_2^2$, 所设定的最大的 $\sqrt{J_{\max}}$ 为 115 μm , 这意味着振动 V1 和 V2 都必须在 80 μm 以下。从试验结果看来, 振动 V1 和 V2 一直没有超过 80 μm , 实验的转速为 2 350 r/min, 这在临界转速附近。

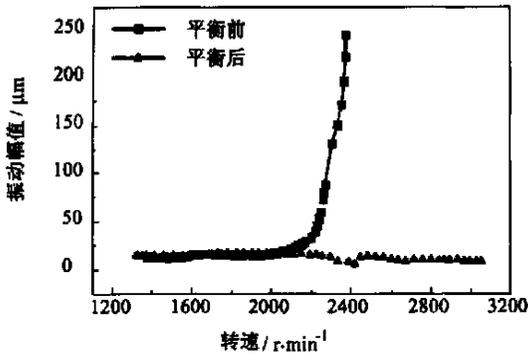


图 6 测点 V1 的波特图

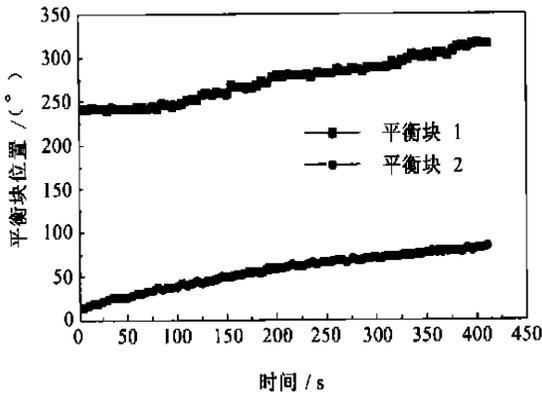


图 7 平衡块位置的变化

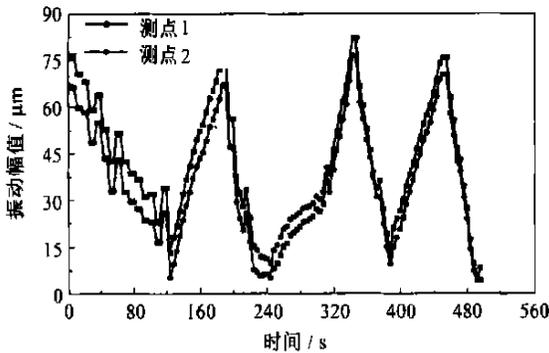


图 8 振动变化

7 结论

(1) 将电磁平衡头应用于多盘柔性转子系统能够成功地实现在线自动平衡。目前本系统中动平衡头的最高转速已达 3 000 r/min;

(2) 对工作在一阶临界转速附近的转子, 一个平衡头就足以使转子在整个工作转速范围内的振动维持在较低水平;

(3) 对电磁平衡头来说, 影响系数平衡法是一种很好很有效的平衡方法;

(4) 实验系统对时变的不平衡量有很好的响应能力。

在平衡过程中, 如果不希望出现振动的暂时增大, 那么可以采用三平衡块的平衡头结构。在这样的平衡头中有三个平衡块, 每块仅作单向移动。初始时平衡块两两 120° 分布。三平衡块的平衡头较两平衡块的平衡头的动平衡能力增加了很多, 而且动平衡方法和平衡块移动方案也更加灵活。

参考文献:

- [1] 卢奂采. 不平衡响应的主动控制[D]. 杭州: 浙江大学, 1996.
- [2] KNOSPE C R. New result in the control of rotor of synchronous vibration[A]. *Proc of Fourth International Symposium on Magnetic Bearing* [C]. Zurich, ETH, 1994. 119-124.
- [3] VAN DE VEGTE. Balancing of flexible rotors during operation[J]. *J Mech Engng Sci*. 1981, 23(3): 257-261.
- [4] BISHOP R E D. On the possibility of balancing rotating flexible shafts [J]. *J Mech Engng Sci*. 1982, 24(3): 215-220.
- [5] XIN Y. General simulated annealing [J]. *J of Computer Sci & Tech*. 1991, 4(4): 329-338.
- [6] DAVIS L. Handbook of genetic algorithms[M]. New York: Van Nostrand Reinhold 1991.
- [7] 钟一颖, 何衍宗. 转子动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.

(渠 源 编辑)

作者撰写论文摘要注意事项

《热能动力工程》期刊在国际上发挥着重要的作用, 它不仅是国家核心期刊, 还被多家外国重要检索系统收录。为使语言规范, 请您在撰写论文摘要时, 注意以下事项:

1. 摘要 200 字为宜。要求语言通顺、精炼, 具有实质性内容(背景材料不写, 评论性语言不用)。
2. 语法运用恰当。逻辑关系清楚, 指代明确, 搭配合理; 开头不用“本文”字样。
3. 缩写词语交待清楚(外文符号需用汉语文字说明其含义)。

Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 50 ~ 52, 77

With a liquid-phase residual saturation degree S_r being assigned a definition a wet capillary porous media drying-zone is divided into a wet zone and a dry one. On this basis set up was a phase-transformation heat transfer and mass transfer constant-pressure model for the drying process of a wet region with liquid-phase saturation-degree S and temperature T serving as parameters. By using a full-hidden finite difference method a numerical calculation was conducted of the above-cited model. The numerical solution indicates that with the help of the model one can accurately forecast the change of the liquid-phase saturation-degree S and temperature T in the drying process of the wet region. **Key words:** capillary porous media, phase transformation, heat transfer and mass transfer

电磁式在线自动平衡系统及其动平衡方法研究 = The Study of An On-line Automatic Dynamic Balancing System and Its Dynamic Balancing Method When Used on a Flexible Rotor [刊, 汉] / WANG Xi-xuan, ZENG Sheng (Chemical Machinery Research Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 53 ~ 57

An innovative on-line automatic dynamic balancing system is proposed along with a description of its working principle, construction and dynamic balancing method. The system is equipped with one or more than one automatic dynamic balancing head on the shaft of a rotating machine. The stator of the balancing head is capable of producing a non-contact electromagnetic force to drive the balancing disc installed on a rotating shaft. Each balancing head has two or three balancing discs, each of which has been provided with a balancing block (or called the balancing mass). The total balancing vector as a resultant composed of the balancing masses of the two or three balancing discs can balance the loss of balance of the rotor. The vibration of the shaft and positioning of the balancing discs can be detected by relevant sensors. The balancing disc assumes a single-direction movement mode, which can considerably simplify a control system. The movement principle and procedures of the balancing disc aimed at a dynamic balancing of the rotor are also discussed. The dynamic balancing test has been successfully conducted on an experimental test rig incorporating a flexible rotor. **Key words:** automatic dynamic balancing, on-line dynamic balancing, electromagnetic balancing head

基于免疫进化算法的过热汽温自整定 PID 控制研究 = A Study of the Immune Evolutionary Algorithm-based Self-tuning PID Control of Superheated Steam Temperature [刊, 汉] / TAN Ying-zi (Automation Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), SHEN Jiong, LU Zhen-zhong (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 58 ~ 62

In accordance with biological immune-system characteristics the authors have come up with a method of self-tuning PID controller parameters on the basis of an immune evolutionary algorithm. The immune evolutionary algorithm has introduced memory cells and features diversity and an anti-body concentration regulation mechanism, ensuring a rapid and stable convergence to attain an overall optimal point. A simulation of the superheated steam temperature control system has demonstrated the validity of the recommended algorithm. **Key words:** immune evolutionary algorithm, PID parameter self-tuning, superheated steam temperature control

火电厂耐热钢承压部件的蠕变损伤研究 = A Study of the Creep-related Damage of Heat-resistant Steel Pressure Parts of a Thermal Power Plant [刊, 汉] / GUO Jing (Institute of Power & Mechanical Engineering under the Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072), ZHAN Ping (Institute of Urban Construction under the Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072), WANG Wen-an (Institute of Civil Engineering under the Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 63 ~ 66

Heat-resistant steel materials are often used for the pressure parts and components of a thermal power plant, such as steam pipelines. After being subjected to high-temperatures and high-pressures lasting for a long time and with the even-