

# 人工自愈与动力机械振动故障靶向抑制

高金吉<sup>1,2</sup> 王维民<sup>1\*</sup> 何立东<sup>2</sup> 江志农<sup>1</sup>

(北京化工大学 机电工程学院 1. 发动机健康监控及网络化教育部重点实验室;

2. 高端机械装备健康监控与自愈化北京市重点实验室,北京 100029)

**摘要:** 人工自愈是在故障机理和风险分析的基础上,通过仿生设计赋予机器自发作用的维持健康状态的能力,从而使机器储存、补充和调动自愈力以维持机体的健康状态。透平压缩机、发电机组和航空发动机等动力机械是工业和国防的心脏设备,一旦发生故障将导致事故和巨大损失,在运行中通过自监测、自诊断和主动控制来抑制故障的发生以实现自愈化,是机器向高级智能阶段发展研究中的一个重要方向。本文总结了北京化工大学诊断与自愈工程(DSE)研究中心在人工自愈与动力机械振动故障靶向抑制方面的主要研究工作及成果,并以转子轴系不平衡和压缩机转子失稳振动为例,证明了靶向抑制方法的有效性。以上成果可为自主开发具有自愈功能的智能动力机械提供科学依据。

**关键词:** 动力机械; 人工自愈; 振动; 靶向抑制

**中图分类号:** TH113.1 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2018.05.016

## 引言

离心压缩机、陆用燃气轮机、航空发动机等动力机械一直是工业生产和国防的心脏设备,例如用于深海油气开采、煤气化、天然气远距离输送的燃气轮机和离心压缩机等。这类动力机械的显著特征一是高参数(高压、大功率、高流量、大推重比),二是日趋复杂的结构,所以其故障问题就显得更加突出。当前如航空发动机等动力机械已成为战略必争的关键装备,如何使其少故障或者无故障长周期运行,此问题日益受到工程和学术界的关注。

由于环境、工况异常和故障干扰等原因,动力机械不可避免会发生故障。大型流程工业广泛采用的传统安全保护方法是依靠紧急停车(ESD)系统来准确监测,并及时、准确地做出响应,但这种方法需要停机操作,对于连续生产损失巨大。因此如何深入了解透平机械复杂机电系统的动力学行为,准确预测其对激励载荷的响应,通过实时监测诊断出产生异常状态的原因,并通过智能决策和主动控制方法在运行中抑制和消除故障,确保机器平稳可靠运行,

实现机械系统故障自愈化,成为当代工程科技界最大的挑战之一<sup>[1-2]</sup>。

中国科学院先进制造领域战略研究组指出,至2050年,装备的智能化水平将得到本质上的提高,具体体现在装备不仅具有参数调节的适应能力,同时也具有结构适应能力。结合材料及信息技术的进步,装备自我进化和升级的能力将促进装备的智能化水平由可控化、自动化向真正实现自维护、自适应和自进化的高级智能阶段发展<sup>[3]</sup>。

本文总结诊断与自愈工程(DSE)研究中心如下动力机械自愈化研究成果:1)基于自适应控制的实时施加靶向自愈力的方法,开发出电磁和气压液体式自动平衡装置,构建了可在转子运行过程中自行消除转子不平衡振动故障的靶向自愈调控系统;2)提出基于电磁给力器的失稳故障的靶向抑制方法,研究出一种高精度、可靠、可工程应用的稳定性识别方法与稳定性测试方法和系统;3)开发出多转子轴系不平衡振动的多靶点、多环节自愈调控方法。

## 1 人工自愈理论与方法概述

人工自愈理论与方法研究如何使装备系统在运行中自行开展主动控制,即具备故障自愈功能,在运行中自行抑制或消除故障,或对缺陷进行自修复,而不是停机由人来排除故障。人工自愈和人工智能均属于仿生机械学的研究领域,可改变仅靠故障停机

收稿日期: 2018-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(51775030)

第一作者: 男,1942年生,教授,中国工程院院士

\* 通信联系人

E-mail: wwmbuct@163.com

保护机器安全和完全依赖人去修复机器的传统方式。从基于人工智能的故障又快又准地诊断到基于人工自愈的精稳抑制,装备的安全科学化水平将得到大幅度提高。人工自愈和人工智能也是研发智能装备的理论基础,人工智能模拟人脑机制,控制机器的行为从而实现自动化;人工自愈模仿人和动物的自愈机制,抑制故障的发生发展以实现自愈化;人工智能会使装备更聪明,人工自愈会让装备更健康<sup>[4]</sup>。

机器故障自愈系统是通过机器复杂系统的运行状态及工况进行实时监测,探测分析可能产生故障的条件及早期故障征兆,然后采用比较判别、诊断预测、智能决策和主动控制等方法,在运行中使机器系统不具备产生故障的条件或自行将故障消除在萌芽中,或在运行中自行修复机器部件的损伤,从而使机器不发生故障或可不停机由异常状态恢复到正常状态,确保机器健康运行。机器故障自愈系统框图如图 1 所示<sup>[4]</sup>。

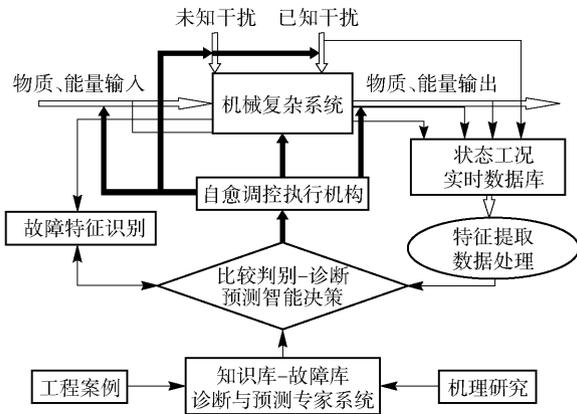


图 1 机器故障自愈调控系统模型<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Model of the machine fault self-healing control system<sup>[4]</sup>

机器的自愈调控系统涵盖如下内容:1) 状态自感知——工况状态多参数同步采集;2) 实时自分析——分析因果及关联;3) 科学自决策——参数和结构调整;4) 精准自执行——多目标精稳调控。机器的自愈调控系统是典型的信息物理生产系统(cyber-physical production systems, CPPS),是信息和装备系统及物质流、能量流的深度融合。人体经络是具有敏感节点和功能连接的神经-内分泌-免疫网络,人体经络的复杂网络不仅是遍布全身的系统,而且可以通过敏感节点及其功能连接,对身体起调控作用<sup>[5]</sup>。自愈调控系统可以通过线缆传递信息以影响机器自身和能量、物质、信

息的输入输出,现代机器自愈调控系统的传感器群、信息网络、智能控制器系统与人体的上述系统非常相似,可以实现智能快准诊断和自愈精稳调控。

为了防止故障酿成事故,石化、冶金等行业的很多重要装备都设有停车联锁或紧急停车系统,如国际上广泛应用的美国 GE Bently 3500 安全联锁系统,只要振动、轴位移或轴承温度单一监测量值超过规定阈值就立即停车。这种机制对保护机器起到了重要作用,但频繁故障停机会造成巨大经济损失。

机器自愈调控系统能抑制机器可能产生的损坏力,达到运行中自行消除或不产生故障的目的,图 2 为机器从非正常状态经自愈调控返回正常状态的示意图<sup>[4]</sup>。在紧急停车系统之前采用故障自愈调控系统,可显著减少停车损失,降低维修成本,并减少机器对人的依赖程度。

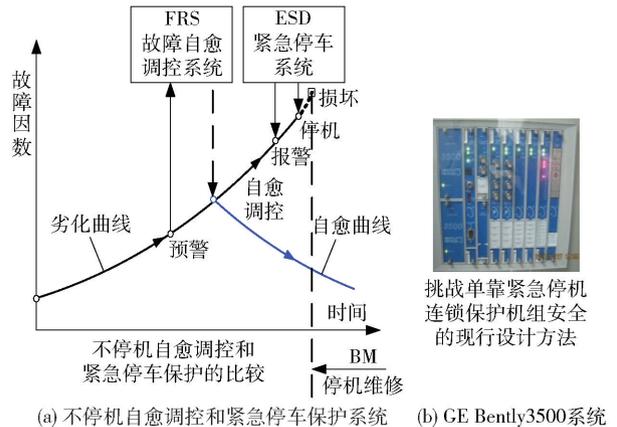


图 2 非正常状态自愈调控返回正常状态示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of abnormal state self-healing regulation returning to normal state<sup>[4]</sup>

## 2 基于电磁和气压液式的转子轴系不平衡振动靶向抑制

DSE 中心在探讨基于多靶点转子轴系振动的靶向抑制原理和多环节调控方法的基础上,建立了转子-轴承-电磁作动器系统模型,来快速在线识别系统状态、激励和响应参数,辨识转子振动故障的特征参数。利用电磁作动器向转子施加多个与转子振动频率相匹配的旋转电磁力,采用电磁作动器的控制电流相位和幅值在线自寻优的方式,使所施加的多个频率成分的电磁力能够削减转子的多频振动幅值,从而实现了转子系统的多频振动在线主动靶向抑制。通过电磁厂驱动配重块 1 和配重块 2 的周向

移动,可以改变转子的质量分布。变质量分布(双配重块)平衡原理示意如图 3 所示<sup>[6]</sup>,电磁平衡试验台实物如图 4 所示<sup>[6]</sup>。

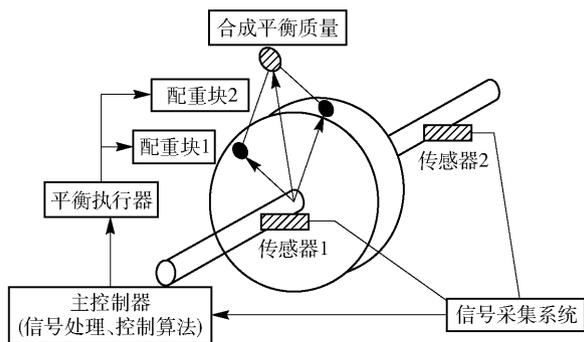


图 3 变质量分布(双配重块)平衡原理示意图<sup>[6]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of the principle of balance of variable mass distribution (double weight)<sup>[6]</sup>



图 4 电磁平衡试验台实物图<sup>[6]</sup>

Fig. 4 Electromagnetic balance test bench (physical map)<sup>[6]</sup>

运用靶向自愈原理,通过无错调靶向控制策略得到目标相位后,再应用无错调移动算法进行一次平衡,转子振动幅值从 18.6  $\mu\text{m}$  下降到 0.7  $\mu\text{m}$ 。在整个平衡过程,电磁平衡装置的 A 盘反向移动了 7 步,B 盘正向移动了 7 步;对应实际的驱动脉冲时间  $t_0 = 240 \text{ ms}$  进行计算,整个平衡过程耗时 1.68 s,振动降低了 96%。图 5 为电磁式自动平衡控制效果图<sup>[6]</sup>。

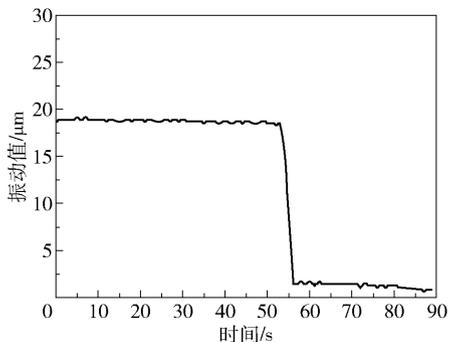
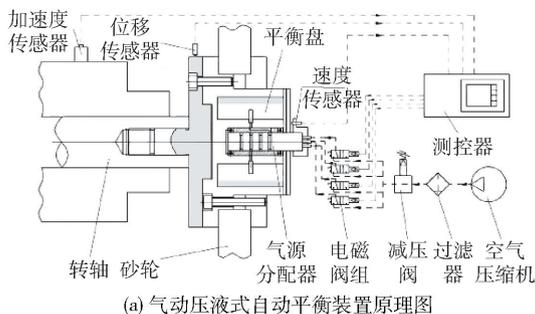


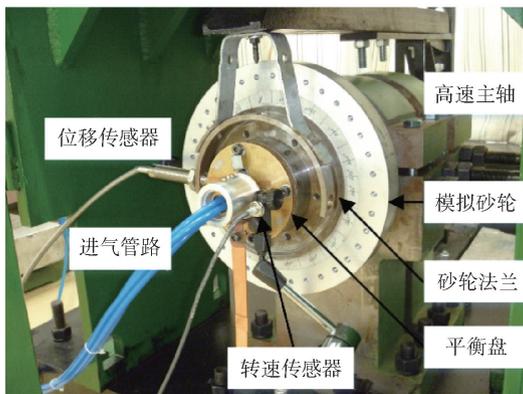
图 5 电磁式自动平衡系统控制效果图<sup>[6]</sup>

Fig. 5 Control effect diagram of the electromagnetic automatic balance system<sup>[6]</sup>

基于气压液体的原理,DSE 中心分别研制出适用于穿轴、轴端、轴内 3 种工况的原理样机各一套,图 6 为气动压液式自动平衡装置的原理图及轴段自动平衡试验台实物图<sup>[7]</sup>,图 7 为气压液体平衡执行器的实验平衡效果<sup>[7]</sup>。在实验过程中,设定系统允许的振动幅值为 0.3  $\mu\text{m}$ ,对该平衡执行器在 15 600 r/min 转速下进行在线自动平衡实验,实验结果显示,经过 7 s 的自动平衡后,系统振动幅值由初始的 1.4  $\mu\text{m}$  降低至 0.25  $\mu\text{m}$ ,下降幅度达 75%。



(a) 气动压液式自动平衡装置原理图



(b) 轴端安装自动平衡实验台

图 6 端装式平衡系统实验装置<sup>[7]</sup>

Fig. 6 End-mounted balance system experimental device<sup>[7]</sup>

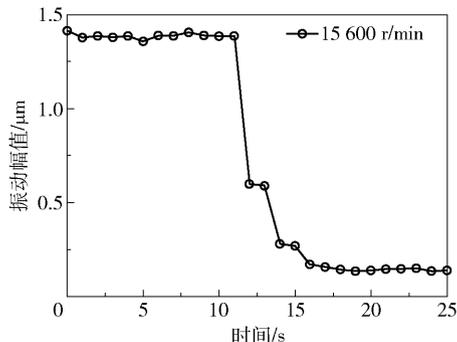


图 7 气压液体式靶向自愈调控系统实验验证<sup>[7]</sup>

Fig. 7 Experimental verification of the pneumatic liquid-based targeted self-healing regulation system<sup>[7]</sup>

### 3 压缩机组失稳机理与基于电磁自愈力靶向抑制

振动故障靶向抑制原理来自于医学的靶向治疗,通过在动力机械运行中实时诊断预测故障原因和产生条件来确定靶点目标,再通过智能决策适时施加自愈力来改变刚度、阻尼、质量分布或激励,从而抑制振动故障。靶向自愈调控原理如图 8 所示。

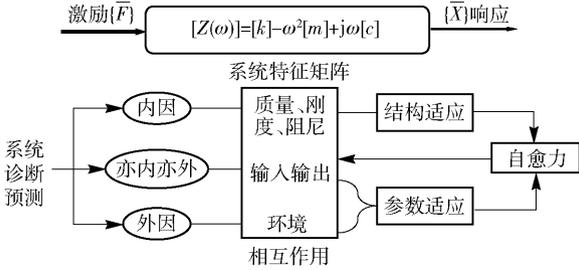


图 8 靶向自愈调控原理图

Fig. 8 Schematic diagram of targeted self-healing regulation

在透平机械中,转子和静子之间微小间隙内的流体周向流动会产生作用于转子的非保守力,它是导致转子失稳的主要因素。这种作用力主要产生于叶轮、密封、轴承等处,在动力学中常用交叉刚度来描述其大小,表达式如式(1)

$$F_{k_{cross}} = - \begin{bmatrix} F_{cx} \\ F_{cy} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & q \\ -q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $F_{k_{cross}}$  为作用于转子的非保守力,  $x_s, y_s$  为转子的位移,  $F_{cx}, F_{cy}$  为沿坐标轴  $x, y$  方向的作用力,  $q$  为交叉刚度系数,负号表示力的方向与转子位移方向相反。根据牛顿第二定律,忽略陀螺效应,转子运动方程可写为

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{y}_s \end{bmatrix} = \sum F_{sd} + \sum F_{sk} + \sum F_{k_{cross}} + \sum F_{excite} = - \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & q \\ -q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + \sum F_{excite} \quad (2)$$

式中,  $m$  表示转子质量,  $\ddot{x}_s, \ddot{y}_s$  为转子的加速度,  $\dot{x}_s, \dot{y}_s$  为转子的速度,  $F_{sd}$  为阻尼力,  $c_s$  为阻尼系数,  $F_{sk}$  为弹性恢复力,  $k_s$  为弹性系数,  $F_{k_{cross}}$  为交叉刚度力,  $q$  为交叉刚度系数,  $F_{excite}$  为作用于转子上的其他激振力。将式(2)重新整理得到式(3)

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{y}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & q \\ -q & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于自由振动,有  $F_x(t) = F_y(t) = 0$ ,此时令  $Z_s = x_s + jy_s$ ,则式(3)可改写为

$$m\ddot{Z}_s + c_s\dot{Z}_s + (k_s - jq)Z_s = 0 \quad (4)$$

令  $Z_s = \bar{Z}_s e^{st}$ ,则式(4)可写为

$$ms^2 + c_s s + (k_s - jq) = 0 \quad (5)$$

求解式(5),可得特征值  $s$  为

$$s = \begin{cases} \left( -\frac{c_s}{2m} + \frac{q}{2\sqrt{k_s m}} \right) \pm j\sqrt{\frac{k_s}{m}} \\ \left( -\frac{c_s}{2m} - \frac{q}{2\sqrt{k_s m}} \right) \pm j\sqrt{\frac{k_s}{m}} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中,  $\frac{q}{2\sqrt{k_s m}} > \frac{c_s}{2m}$  时,  $-\frac{c_s}{2m} + \frac{q}{2\sqrt{k_s m}} > 0$ ,转子

将发生失稳;令  $\sqrt{\frac{k_s}{m}} = \omega_{ns}$  为转子系统的自然频率,则临界交叉刚度  $q$  为

$$q_{max} = c_s \sqrt{\frac{k_s}{m}} = c_s \omega_{ns} \quad (7)$$

因此,要保持转子稳定可以采取两种措施:一是降低系统的交叉耦合刚度  $q$ ,二是增加系统的阻尼  $c_s$ 。

根据振动故障靶向抑制原理研究稳定性控制方法,本文提出并实验验证了基于刚度控制和基于阻尼控制的方法,其控制力的表达式分别如式(8)和式(9)<sup>[8]</sup>所示。

$$F_{kControl} = \begin{bmatrix} F_{cx} \\ F_{cy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -q_c \\ q_c & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$F_{sdControl} = \begin{bmatrix} F_{cx} \\ F_{cy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_c & 0 \\ 0 & d_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过控制器电磁轴承给转子施加一个反向交叉刚度可以抑制振动。控制力的施加步骤如下:首先通过传感器分别采集转子系统在  $x$  方向和  $y$  方向的振动信号,然后将比较器与理论值进行比较得到振动信号与理论信号的误差值,再由比例控制器处理误差值得到控制信号,最后控制信号经功率放大器放大后由电磁轴承交叉施加到转子系统的  $x$  方向和  $y$  方向上,从而实现转子振动的控制。位移反馈控制策略如图 9 所示<sup>[9]</sup>。利用类似步骤,通过施加阻尼的速度反馈方式可以控制转子系统的振动。速度反馈控制策略如图 10 所示<sup>[9]</sup>。

针对离心压缩机叶轮布置方式及平衡盘密封结

构和电磁轴承的特性,开发出了电磁阻尼密封作为靶向抑制执行器。图 11 为在电磁阻尼密封的安装方式<sup>[10]</sup>,图 12 为在背靠背离心压缩机安装电磁阻尼密封的三维立体图和剖视图<sup>[10]</sup>。

电磁阻尼密封的内部结构如图 13(a)、(b),主要由圆孔、磁极、线圈和密封体组成,磁极为转子施

加控制力,多个圆孔构成了孔式阻尼密封,密封体将磁极在圆周方向封闭起来构成了连续表面。电磁阻尼密封包括有孔式和无孔式两种,图 13(c)、(d)为其实物结构图。

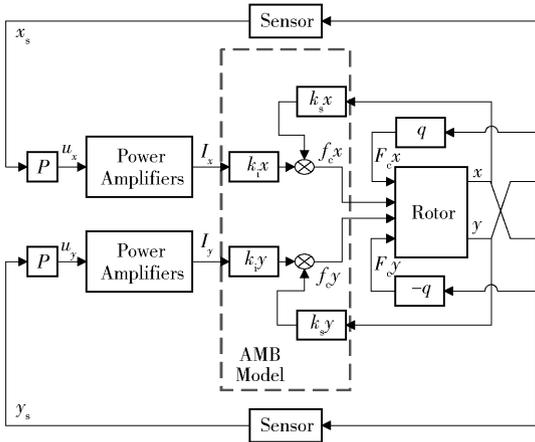


图 9 位移反馈控制策略<sup>[9]</sup>

Fig. 9 Displacement feedback control strategy<sup>[9]</sup>

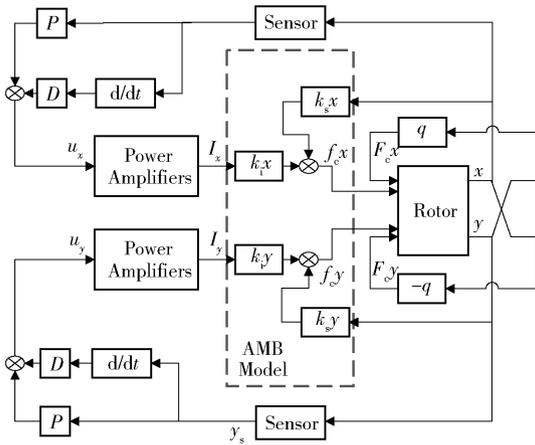
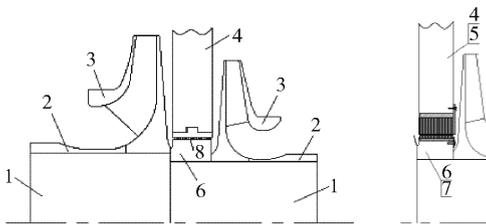


图 10 速度反馈控制策略<sup>[9]</sup>

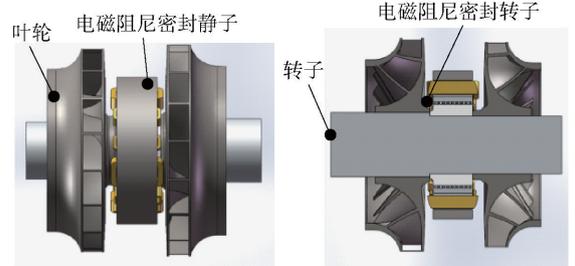
Fig. 10 Speed feedback control strategy<sup>[9]</sup>



1—转子; 2—一定距套; 3—叶轮; 4—隔板; 5—电磁执行器静子; 6—平衡盘; 7—电磁执行器转子; 8—平衡盘密封。

图 11 电磁阻尼密封安装方式<sup>[10]</sup>

Fig. 11 Diagram of the electromagnetic damping seal installation<sup>[10]</sup>



(a) 背靠背离心压缩机三维立体图 (b) 安装电磁阻尼密封剖视图

图 12 背靠背离心压缩机安装电磁阻尼密封的三维立体图和剖视图<sup>[10]</sup>

Fig. 12 Three-dimensional and sectional views of an electromagnetic damping seal installed in a back-to-back centrifugal compressor<sup>[10]</sup>

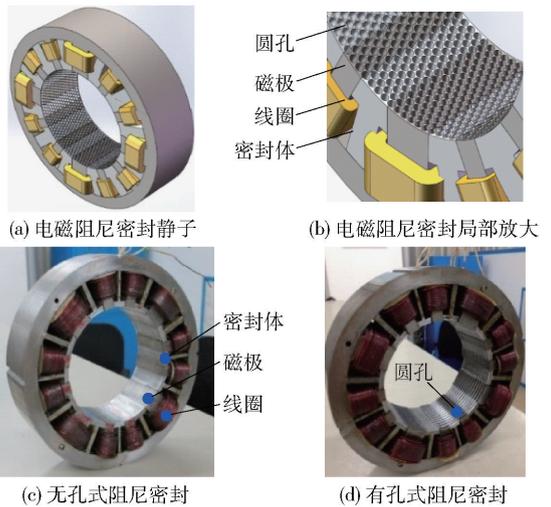


图 13 集成式电磁阻尼密封结构<sup>[10]</sup>

Fig. 13 Structure of the integrated electromagnetic damping seal<sup>[10]</sup>

运用所开发的电磁阻尼密封进行转子稳定性控制策略研究,建立了如图 14 所示的实验台进行振动控制效果验证<sup>[9]</sup>,图 15 和图 16 分别为基于刚度控制的位移反馈效果图和基于阻尼控制的速度反馈效果图<sup>[9]</sup>。可以看出,转子发生失稳故障时,其主要表现为转子一阶模态频率的异步振动,且振动随着时间的推移逐步增大,施加振动控制后异步振动消失。本文所开发的控制算法均能够快速有效地进行稳定性控制。



图 14 电磁激励与控制实验装置<sup>[9]</sup>

Fig. 14 Electromagnetic excitation and control experimental device<sup>[9]</sup>

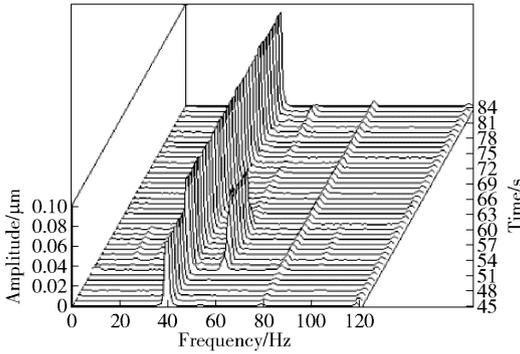


图 15 基于刚度控制的位移反馈效果图<sup>[9]</sup>

Fig. 15 Stiffness control effect diagram of displacement feedback<sup>[9]</sup>

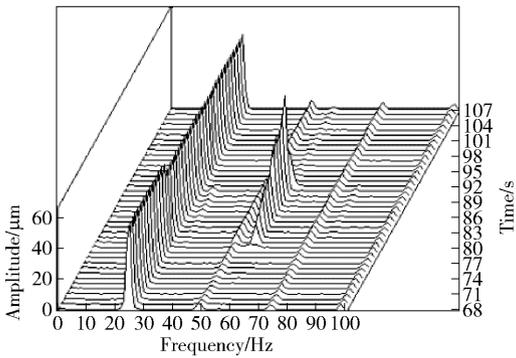


图 16 基于阻尼控制的速度反馈效果图<sup>[9]</sup>

Fig. 16 Damping control effect diagram of speed feedback<sup>[9]</sup>

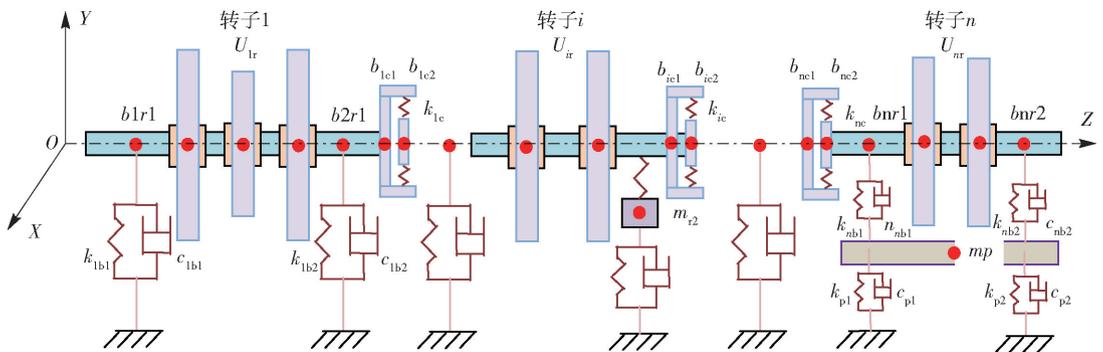


图 17 多支承-联轴器-转子系统结构示意图<sup>[11]</sup>

Fig. 17 Schematic diagram of the multi-support-coupling-rotor system<sup>[11]</sup>

### 4 转子轴系不平衡振动的多目标靶向自愈调控

研究多转子轴系的动力学特性,运用有限元法建立轴系动力学模型如图 17 所示<sup>[11]</sup>。通过仿真和实验得出:透平机械 N + 1 支撑轴系转子的跨内加重振动仍以单转子不平衡振动特性为主,即在所在跨进行加重激励,则轴系以该跨振动为主,加同向配重,则主要激起转子一阶振动,加反相配重,则主要激起二阶振动;具有独特的转子外伸端振动特性,即在转子跨外进行加重激励,则转子的两支承振动相位在一阶临界转速之前为反相,之后则为同相,且不管是同相配重还是反相配重,都能激起其他转子的一阶和二阶振动;轴系转子间相互振动影响明显,其他转子支承与轴系加重转子之间的距离与振动幅值密切相关,越靠近加重转子,这种影响越大,而远离加重转子的支承振动相对影响较小。

通过基于六维对中的透平机械 N + 1 支撑轴系耦联优化研究,发现了 N + 1 支撑轴系各转子间残余不平衡量相位差对轴系振动影响的新规律,即在轴系最低阶临界转速之前,各支承的振幅较低;在高转速下(即在轴系各跨转子的一阶临界转速之上),残余不平衡同相位组合时最差,第一跨转子与其他各跨转子反相位组合时最优。提出了基于六维对中的 N + 1 支撑轴系耦联优化安装方法,即通过各转子间残余不平衡量相位差优化组合,无需改变轴系结构即可使振动达标。该优化安装方法具有较好的工程应用价值。

对透平机械 N + 1 支撑轴系进行整机无试重虚拟动平衡研究,提出了基于影响系数和滞后角的振动仪相位测定含义分析方法,该方法能方便快速判断出振动仪相位测量的含义;提出了基于模态振型和影响系数法的大型柔性转子高速动平衡法,设计

了合理的平衡工艺,能有针对性地选择平衡校正面和平衡转速点,将高速动平衡法应用于哈汽生产的66万千瓦超超临界汽轮机低压转子高速动平衡,只需3~5次启停车就实现了这类大型特殊柔性转子的高速动平衡,解决了传统需频繁多次启机平衡的难题;提出一种多平面多测点多转速下影响系数动平衡法,综合考虑了转子的初始偏摆值、试重的去与留以及成组加重等实际操作问题,开发出透平机械多转子轴系动平衡实用程序,满足了多转子轴系平衡计算功能要求。四跨五支承轴系整机无试重虚拟动平衡试验台实物如图18所示<sup>[11]</sup>。

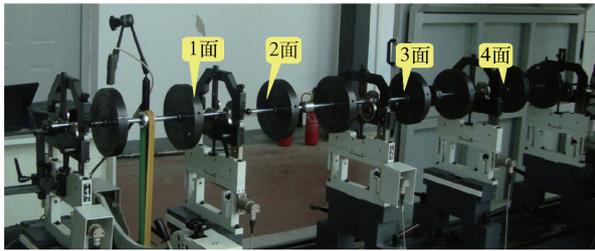


图18 四跨五支承轴系整机无试重虚拟动平衡试验台<sup>[11]</sup>

Fig. 18 A four-span five-bearing shafting system without the test weight virtual dynamic balance test bench<sup>[11]</sup>

## 5 结论

人工自愈和人工智能均属于仿生机学研究的领域,人工自愈是将人和动物所特有的自愈机制赋予机器,改变仅靠故障停机保护机器安全和完全依赖人修复机器的传统方式。从基于人工智能的故障快准诊断到基于人工自愈的精稳抑制,将大幅度提高装备的本质安全化水平。

透平机械的工作环境日益多变且复杂化,自愈化可根据环境和任务的变化,使装备不仅具有参数调节的适应能力,也具有结构适应能力,从而促进装备的智能化水平由可控化和自动化迈向自维护、自适应和大幅减少对人依赖程度的高级智能阶段。自愈化与自动化一样,是实现智能制造的重要途径,具有广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 高金吉. 人工自愈与机器自愈调控系统[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 83-94.  
GAO J J. Artificial self-healing and machine self-healing control system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(8): 83-94. (in Chinese)
- [2] 中国工程院咨询项目组. 工程科技与发展战略咨询研

究报告集——装备故障自愈工程及其在我国推广应用的建议[M]. 北京: 中国工程院出版社, 2006.

- Consulting Group of Chinese Academy of Engineering. Research report on engineering technology and development strategy consulting-equipment failure self-healing project and suggestions for its application in China [M]. Beijing: Chinese Academy of Engineering Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 中国科学院先进制造领域战略研究所. 中国至2050年先进制造科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
Institute of Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences. China's roadmap for advanced manufacturing technology development by 2050 [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [4] 高金吉. 机器故障诊治与自愈化[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.  
GAO J J. Diagnosis and treatment of machine failure and self-healing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese)
- [5] 唐孝威, 沈小雷, 何宏建. 关于人体经络的一个试探性观点[J]. 中国工程科学, 2008, 10(11): 14-17.  
TANG X W, SHEN X L, HE H J. A tentative point of view on human meridians [J]. China Engineering Science, 2008, 10(11): 14-17. (in Chinese)
- [6] 陈立芳. 电磁驱动双配重平衡头与自动平衡优化控制方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.  
CHEN L F. Research on electromagnetically driven double counterweight balancing head and automatic balance optimization control method [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012. (in Chinese)
- [7] 潘鑫, 吴海琦, 高金吉. 旋转机械气压液体式不平衡振动故障靶向自愈调控系统[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 146-152.  
PAN X, WU H Q, GAO J J. Targeted self-healing control system for liquid mechanical unbalanced vibration faults in rotating machinery [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 146-152. (in Chinese)
- [8] 王维民, 齐鹏逸, 李启行, 等. 离心式压缩机转子系统稳定性控制方法研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 102-106.  
WANG W M, QI P Y, LI Q H, et al. Research on stability control method of centrifugal compressor rotor system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6): 102-106. (in Chinese)
- [9] LI Q H, WANG W M, WEAVER B, et al. Active rotor-dynamic stability control by use of a combined active magnetic bearing and hole pattern seal component for back-to-back centrifugal compressors [J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 127: 1-12.
- [10] LI Q H, WANG W M, LIU B, et al. Investigation on the seal structure design and rotor vibration controller for

back-to-back centrifugal compressor[C] // Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbine Technical Conference and Exposition. Seoul, 2016.

[11] 宾光富. 透平机械 N + 1 支撑轴系耦联优化及整机无试重动平衡研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.

BIN G F. Turbine mechanical N + 1 support shaft coupling optimization and whole machine test-free recalculation [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013. (in Chinese)

## Artificial self-recovery and target suppression of power machine vibration faults

GAO JinJi<sup>1, 2</sup> WANG WeiMin<sup>1\*</sup> HE LiDong<sup>2</sup> JIANG ZhiNong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Engine Health Monitoring and Networking, Ministry of Education;

2. Beijing Key Laboratory of Health Monitoring Control and Fault Self-recovery for High-end Machinery, College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Based on the mechanism of fault and risk analysis as well as bionics design, artificial self-recovery is designed to provide a machine with the ability to maintain a healthy state spontaneously. In this way, the machine can store, replenish and mobilize self-recovery power to maintain its healthy state. Power machines such as turbo-compressors, generators, and aero-engines are key equipment in industry and defense. Faults in these machines, which may even lead to accidents can result in significant losses. Therefore, developing machines with advanced intelligence involving self-monitoring, self-diagnosis and active control to suppress faults, resulting in self-recovery during operation, has become an important research direction. The paper summarizes the research on artificial self-recovery and target suppression of power machine vibration faults carried out in the Diagnosis and Self-recovery Engineering Research Center (DSE) at Beijing University of Chemical Technology (BUCT). The experimental results cover the unbalance of a multi-rotor shafting system, the mechanism of instability, and the effectiveness of the targeted suppression method. These achievements can provide a scientific basis for the development of intelligent turbomachinery with self-recovery functionality.

**Key words:** power machine; artificial self-recovery; vibration; targeted suppression

(责任编辑:汪 琴)

### 团队简介



团队负责人 高金吉院士

北京化工大学诊断与自愈工程研究中心(简称DSE中心)由设备诊断工程专家、中国工程院院士高金吉教授倡导,在教育部“211工程”支持下于2001年7月建立。团队面向我国能源动力机械健康与能效监控需求,坚持“产学研”结合原则,开展在线监测诊断与故障自愈化技术基础理论与工程应用研究。通过为中国石化和中国石油等大型企业开发“机泵群”实时监测网络和远程诊断系统,逐渐在设备检测和诊断领域形成了一定的技术优势。2006年建立化工安全教育部工程研究中心、国家安全生产监督管理局危险化学产品生产故障预防及监控基础研究实验室和国家安全生产监督管理局新危险化学品评估及事故鉴定基础研究实验室,成立了中国石油远程监测诊断(北京)中心。2010年成立了高端机械装备健康

监控与自愈化北京市重点实验室。2014年与空军装备研究院建立航空发动机振动监控联合实验室,2016年建立了航空发动机健康监控研究所,并与合肥通用机械研究院建立国家压缩机技术国家重点实验室压缩机健康智能监控中心,2017年与中国航发沈阳发动机研究所建立航空发动机振动健康监控联合实验室,2018年成立了发动机健康监控及网络化教育部重点实验室。

实验室在编教师19人,其中中国工程院院士1人,国家级有突出贡献中青年专家1人,教育部“新世纪人才”1人,北京市高等学校“青年英才计划”1人,教授(含研究员)6人,副教授(含副研究员)7人,见习副教授2人,讲师2人,博士后2人。在读博士17人,在读硕士114人。